# VYSTUŽENÉ SKLENÉ NOSNÍKY

*M. Slivanský* [1)]

## ABSTRACT

*To design a safe structural glass beam one has to overcome the disadvantage of glass failing brittle and without any warning. Safe failure behaviour can be reached by bonding a small stainless steel reinforcement in the tensile zone.*

## ÚVOD

Najväčším problémom pri využívaní skla, ako konštrukčného materiálu je jeho nepredvídateľný a veľmi krehký charakter porušenia. Plastický charakter porušovania je možné dosiahnuť iba kombinovaním skla s inými konštrukčnými materiálmi. Medzi takéto materiály patria predovšetkým umelé hmoty, kovy a v niektorých prípadoch dokonca aj drevo. Najčastejšie sa využívajú oceľové, v niektorých prípadoch nerezové, výstužné pásky alebo karbónové vlákna, ktoré spolu so skleným prvkom vytvárajú kompozitný nosný systém. Výsledkom poškodenia skleného prvku nie je jeho náhly kolaps, ale čiastočná zmena statického pôsobenia.

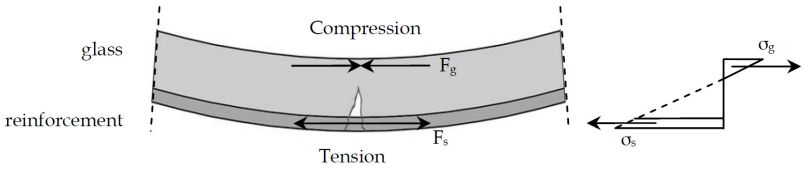
Vývoj v oblasti navrhovania sklených nosníkov sa na začiatku uberal odlišným smerom. Zvyšovanie odolnosti sklených prvkov, v prípade mechanického poškodenia bolo realizované vytváraním vrstvených prierezov. Hlavná podstata zvýšenia bezpečnosti spočívala v predimenzovaní konštrukcie. Vonkajšie vrstvy skla sa obvykle do celkovej únosnosti prvku nezapočítavali a tvorili len obal vnútorných nosných častí [1]. Pri niektorých prípadoch sa zvýšenie odolnosti posudzovalo ako schopnosť čiastočne poškodeného vrstveného prvku odolávať po určitú dobu zníženej hladine namáhania.

Využitie vrstveného skla pri konštrukcii sklených nosníkov má svoje výhody aj z pohľadu štatistického rozdelenia pravdepodobnosti. Štatisticky je odolnosť dvoch rovnakých nosníkov

[1)] Miloš Slivanský, Ing., Katedra kovových a drevených konštrukcií, STU Stavebná fakulta, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, milos.slivansky@stuba.sk

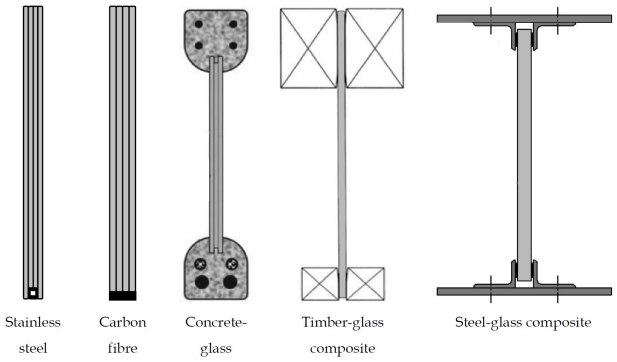
väčšia (alebo minimálne rovnaká) ako dvojnásobok odolnosti jedného nosníka. Z toho vyplýva, že dva sklené nosníky s polovičnou hrúbkou majú štatisticky vyššiu odolnosť, ako samostatný nosník s dvojnásobnou hrúbkou skla. Najvýraznejšie rozdiely sú pri veľmi nízkych pravdepodobnostiach porušenia prvku [4].

Koncepcia vystužených sklených nosníkov sa zaoberá danou problematikou z iného uhla pohľadu. Namiesto minimalizovania rizika pravdepodobnosti úplného porušenia skleného prvku, sa sústreďuje na dôsledky jeho porušenia a spôsoby zabezpečenia charakteru postupného pretvárneho (plastického) porušovania. Jednou z možností, ako dosiahnuť spomínané vlastnosti, je pripojenie výstužných oceľových pásov v oblasti ťahových napätí pozdĺž okraja skleného nosníka. Vplyvom preťaženia nosníka dôjde ku porušeniu skla, ale rozvoj trhliny bude obmedzený, pretože sa energia lomu čiastočne spotrebuje na deformáciu výstuže. Výstuž vytvorí prepojovací článok medzi trhlinami a prevezme ťahové sily. Spolu s tlakovými silami v nepoškodenej časti skleného prierezu vznikne dvojica síl, a vystužený sklený prvok je naďalej schopný prenášať zaťaženie (obr. 1).




*Obr. 1 – Podstata prerozdelenia namáhania vystužených sklených nosníkov [1]*

V zahraničí bolo vykonaných niekoľko pomerne rozsiahlych výskumných projektov venovaných problematike dosiahnutia pretvárneho porušovania sklených nosníkov. Okrem vystužovania sklených prvkov oceľovými prvkami, sa niektorí výskumníci tiež zaoberali kombinovaním skla s inými materiálmi. Stručný prehľad najaktuálnejších prác je uvedený na obr. 2. Patria sem sklené nosníky vystužené oceľovými pásmi, alebo profilmi, sklené nosníky vystužené karbónovými pásmi, sklo – betónové kompozitné nosníky, sklo – drevené kompozitné nosníky a kombinované sklené nosníky s oceľovou pásnicou.



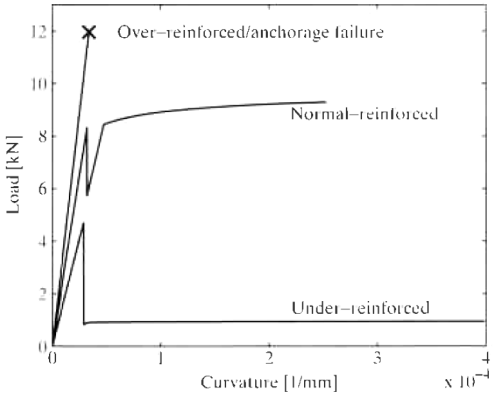

*Obr. 2 – Výskum v zahraničí [1]*

## SKLENÉ NOSNÍKY VYSTUŽENÉ OCEĽOVÝMI PÁSMI, TEORETICKÝ MODEL

Z hľadiska podobnosti vlastností materiálu a konštrukčného usporiadania nosných častí, je možné uvažovať s určitou analógiou princípu fungovania železobetónových nosníkov a sklených nosníkov vystužených oceľovými pásmi. Podobne ako v prípade železobetónových

nosníkov, stupeň vystuženia (okrem iného) ovplyvňuje výsledný charakter porušovania vystuženého skleného nosníka. Základné rozdiely v charaktere porušovania pre rôzne stupne vystuženia ilustruje obr. 3.

Pri optimálnom stupni vystuženia dochádza po vzniku trhlín ku plastickému pretváraniu nosníka, výraznému nárastu jeho deformácií, postupnému rozvoju a roztváraniu trhlín (všetko vplyvom plastizácie materiálu výstuže). Ak je stupeň vystuženia príliš nízky, pri vzniku trhlín nastane výrazné tečenie alebo pretrhnutie výstuže a vystužený sklený nosník sa správa podobne ako nevystužený nosník. Pri vysokom stupni vystuženia nedôjde ku plastizácii výstuže a porušenie má takisto náhly charakter (najčastejšie nastane výrazné odlepenie výstuže, alebo porušenie tlačenej sklenej časti).




*Obr. 3 – Chovanie sklených nosníkov pre rôzne stupne vystuženia [3]*

Obecne je dôležité zohľadniť tiež reologické vlastnosti lepidla. Dlhodobým namáhaním dochádza ku dotvarovaniu lepidla a k zníženiu šmykovej poddajnosti spoja medzi sklom a výstužným prvkom. Výsledkom je zníženie ohybovej tuhosti vystuženého nosníka a nárast normálového napätia v skle v čase.

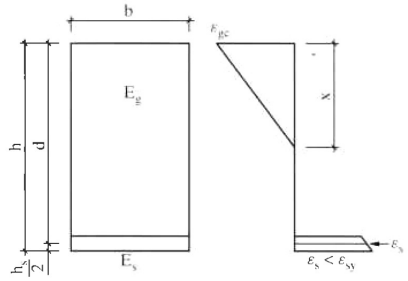
Teoreticky je možné princíp fungovania ohýbaného vystuženého nosníka rozdeliť na niekoľko štádií.

**Štádium I**

V neporušenom stave – štádium I, sklená časť nie je porušená trhlinami a celý systém sa správa lineárne elasticky. Prerozdelenie normálových napätí v priereze je závislé od pomeru tuhostí jednotlivých častí a od šmykovej poddajnosti styku medzi sklom a výstužným prvkom. Zanedbaním vplyvu šmykovej poddajnosti je možné na výpočet normálových napätí v nehomogénnom priereze použiť metódu tzv. ideálneho prierezu a pracovného súčiniteľa *n* (podobne ako v prípade posúdenia spriahnutých oceľo – betónových konštrukcií).

**Štádium II**

Pri analýze vystuženého skleného nosníka v štádiu II sa zavádza z niekoľko predpokladov. Sklená časť prierezu je v oblasti ťahových napätí porušená trhlinami a nepodieľa sa na prenose normálových napätí od ohybového momentu, preto sa pri výpočte neuvažuje. Namáhanie skla v oblasti tlakových napätí a namáhanie oceľovej časti v oblasti ťahových napätí neprekračuje pružnú oblasť pôsobenia oboch materiálov, rovinný prierez zostane aj po pretvorení rovinný a pozdĺžna deformácia jednotlivých vlákien je priamo úmerná ich vzdialenosti od neutrálnej osi, ktorá rozdeľuje prierez na tlačenú a ťahanú časť (obr. 4).




*Obr. 4 – Vystužený prierez, pozdĺžna pomerná deformácia ε, štádium II [3]*

Riešením vznikne obecný vzťah na výpočet polohy neutrálnej osi $x$ v obdĺžnikovom priereze podľa (1). V uvedených vzťahoch $h_g$ označuje výšku prierezu sklenej časti, $b_g$ šírku prierezu sklenej časti. Plocha oceľovej výstuže je označená $A_s$, $d$ je vzdialenosť ťažiska oceľovej výstuže od tlačeného okraja prierezu a $n$ je tzv. pracovný súčiniteľ ($n=E_s / E_g$, kde $E_s$ je Youngov modul pružnosti neskleného materiálu a $E_g$ je Youngov modul pružnosti skla).

$$x = \frac{n\,A_s}{b_g}\left(-1+\sqrt{1+\frac{2\,b_g\,d}{n\,A_s}}\right) \tag{1}$$

Normálové napätie $\sigma_g$ v krajných tlačených vláknach sklenej časti prierezu namáhaného ohybovým momentom $M$ sa vypočíta podľa vzťahu (2).

$$\sigma_g = \frac{2\,M}{b_g\;x\,r} \tag{2}$$

Normálové napätie vo výstuži $\sigma_s$ sa vypočíta podľa vzťahu (3).

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s\;r} \tag{3}$$

Rameno vnútorných síl v štádiu II sa dá určiť priamo z obrázka rozdelenia vnútorných síl po priereze (obr. 4), pretože pôsobisko výslednice tlakových napätí leží v hornej tretine tlačenej časti prierezu, vzťah (4).

$$r = \left(d-\frac{x}{3}\right) \tag{4}$$

**Štádium III**

Pri analýze vystuženého skleného nosníka v štádiu III sa vychádza z rovnakých predpokladov ako v v štádiu II. Namáhanie oceľovej časti v oblasti ťahových napätí však prekračuje pružnú oblasť pôsobenia materiálu. Medza klzu je dosiahnutá vo všetkých vláknach oceľovej výstuže a využíva sa bilineárny pracovný diagram ocele s horizontálnou hornou vetvou. Rozdelenie tlakových napätí v sklenej časti má naďalej lineárny trojuholníkový priebeh. Polohu neutrálnej osi je možné určiť z podmienky rovnosti vnútorných síl po priereze v sklenej a oceľovej časti.

Odolnosť vystuženého prierezu namáhaného ohybovým momentom v štádiu III sa dá vypočítať pomocou vzťahu (5). Vo vzťahu (5) $\varepsilon_g$ označuje pomernú deformáciu krajného vlákna na hornom okraji sklenej časti.

$$M = A_s \, f_y \left( d - \frac{2}{3} \frac{A_s \, f_y}{b_g \, \varepsilon_g \, E_g} \right) \tag{5}$$

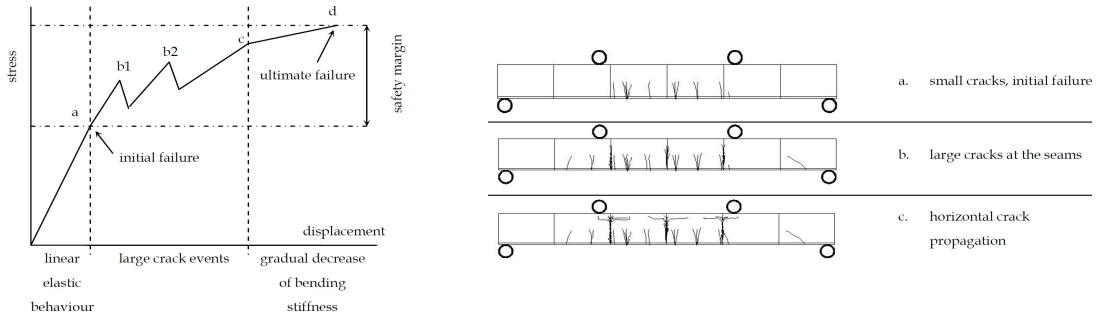
Krajný prípad teoreticky nastane v prípade, keď bude dosiahnutá pevnosť skla v tlaku $f_{cu,g}$ v krajnom tlačenom vlákne sklenej časti prierezu. Maximálna teoretická odolnosť vystuženého skleného prierezu namáhaného ohybovým momentom $M_{ult}$ sa vypočíta použitím vzťahu (6).

$$M_{ult} = A_s \, f_y \left( d - \frac{2}{3} \frac{A_s \, f_y}{b_g \, f_{cu,g}} \right) \tag{6}$$

Teoretická hodnota ohybovej odolnosti vystuženého skleného nosníka $M_{ult}$ však v praxi nie je nikdy dosiahnutá. Finálny kolaps nosníka nenastane pretrhnutím výstuže alebo dosiahnutím pevnosti skla v tlaku, ale dôjde buď k oddeleniu (odlepeniu) oceľovej výstuže, alebo ku zlyhaniu tlačenej sklenej časti vplyvom straty stability a následnému porušeniu skla ťahovým namáhaním od priečneho ohybu. Základný mechanizmus porušovania, odsledovaný na základe experimetálnych prác vykonaných v zahraničí [1], je stručne popísaný ďalej.

## MECHANIZMUS PORUŠOVANIA

Mechanizmus porušovania vystuženého skleného nosníka je ovplyvnený širokým spektrom faktorov. Medzi najvýznamnejšie patria tvar prierezu nosníka, vlastnosti výstužného prvku a vlastnosti spoja medzi sklom a výstužným prvkom (materiál, geometria, usporiadanie, a pod.). Fázy porušovania vystuženého skleného nosníka podľa charakteru a rozsahu poruchy je možné zaradiť do štyroch základných skupín. Túto situáciu približne ilustruje obr. 5.




*Obr. 5 – Mechanizmus porušovania vystuženého skleného nosníka [1]*

**Počiatočné porušenie, malé trhliny**

Pokiaľ nie je sklený nosník nosník porušený trhlinami, správa sa pružne. V okamihu prekročenia ťahovej pevnosti skla na okraji sklenej časti, vznikne jedna alebo niekoľko malých trhlín. Tieto trhliny sa šíria od okraja zhruba do 2/3 výšky prierezu nosníka a ich

šírenie je obmedzené dosiahnutím tlakovej zóny v sklenej časti nosníka. V závislosti od druhu použitého lepidla majú trhliny jednoduchý alebo rozvetvený „V“ tvar.

**Výrazné trhliny na okraji**
Pri ďalšom náraste zaťaženia, dochádza ku poklesu ohybovej tuhosti nosníka a začínajú vznikať výrazné vertikálne trhliny. V závislosti od typu použitého lepidla, dochádza vplyvom náhlej zmeny prerozdelenia síl v priereze, ku lokálnemu oddelovaniu výstuže od sklenej časti. Následkom je výrazný nárast vertikálnych deformácií. Kým dôjde ku úplnemú kolapsu vystuženého nosníka, môže prebehnúť niekoľko obdobných cyklov. Po každom cykle sa postupne ohybová tuhosť vystuženého nosníka zmenšuje a odelovanie výstuže má progresívny charakter.

**Horizontálne trhliny**
Existujúce výrazné vertikálne trhliny sa začínajú rozvíjať horizontálnym smerom pokým sa vzájomne neprepoja. Ohybová tuhosť nosníka klesá rádovo.

**Kolaps prvku (celkové porušenie)**
Za totálne porušenie vystuženého nosníka je možné podkladať niekoľkonásobný pokles jeho ohybovej tuhosti alebo výsledný kolaps. Pri experimetálnych prácach boli pozorované dva hlavné modely mechanizmu totálneho porušenia:

- úplné oddelenie výstuže, ktoré spôsobí, že ťahové sily nemôžu byť ďalej prenášané a nosník kolabuje,
- vydúvanie a úplná ohybová strata stability tlačenej časti prierezu nosníka, oslabenej trhlinami, tlakové sily nemôžu byť ďalej prenášané a nosník kolabuje.

## ZÁVER

V súčasnej dobe je pripravovaný na Katedre kovových a drevených konštrukcií STU v Bratislave experientálny výskum, ktorý bude zameraný na skúmanie vlastností sklených nosníkov z pohľadu zvýšenia odolnosti a tiež z pohľadu zabezpečenia zvyškovej odolnosti porušeného skleného prvku s využitím spolupôsobenia skla s oceľovými materiálmi. Výsledky experimentov budú porovnané vzhľadom na podobné experimetálne práce uskutočnené v zahraničí [1], [2] a [3].

## LITERATÚRA


[1] Louter, Christian, Adhesively bonded reinforced glass beams, HERON Volume 52 (2007) issue 1/2 special issue: Structural glass, http://heron.tudelft.nl.

[2] Louter, Christian; Callewaert, Dieter; Belis, Jan; Veer, Fred; Bos, Freek, Reinforced glass beams; Effect of increased temperatures on the glass-to-reinforcement adhesive bond, Proceedings of the 2008 Structures Congress, SEI, Vancouver, Canada, April 2008

[3] ØLgaard AB, Nielsen JH, Olesen JF, Design of Mechanically Reinforced Glass Beams: Modelling and Experiments, Structural Engineering International 2/2009\

[4] Crompton, Peter Robert, Assessment of design procedures for structural glass beams, A Thesis submitted for the Degree of Master of Science, University Oxford, 1999