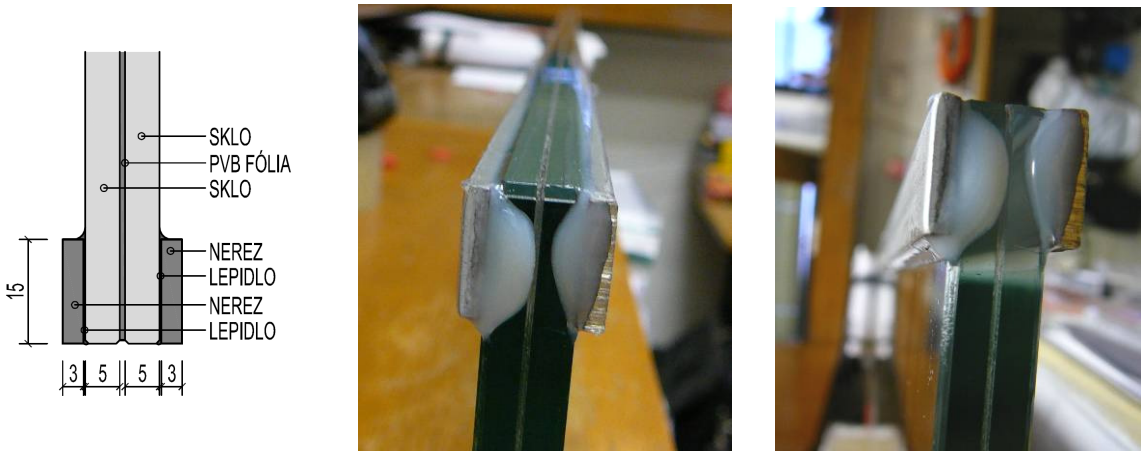
EXPERIMENTÁLNE OVEROVANIE SKLENÝCH NOSNÍKOV

M. Slivanský *

Abstrakt
Experimentálny výskum zrealizovaný na Katedre kovových a drevených konštrukcií STU v Bratislave sa zameral na skúmanie vlastností moderných sklených konštrukcií. Úlohou experimetálnych prác bolo overenie pôsobenia 4 základných typov sklených nosníkov. Boli skúmané nevystužené nosníky z vrstveného nekaleného a plne kaleného skla a tiež rovnaké vystužené nosníky.

1. SKÚMANÉ TYPY NOSNÍKOV, MATERIÁL A GEOMETRIA

Prvá časť experimentálneho výskumu bola zameraná na doplnenenie základných mechanických vlastností skla ako konštrukčného materiálu. Sledoval sa predovšetkým vplyv tepelnej úpravy skiel (kalenie) na pevnosť skla v ťahu a na výsledné zlepšenie odolnosti nevystužených sklených nosníkov.
V rámci druhej časti experimentálneho výskumu bolo skúmané správanie sklených nosníkov vystužených nerezovou pásovinou. Výstužný profil bol pripojený na spodný okraj na oboch povrchoch sklenej časti lepidlom. Výsledky experimetu boli vyhodnotené z pohľadu skúmania charakteru porušovania pre rôzne hladiny namáhania a rôzne štádiá pôsobenia vystuženého skleného nosníka.



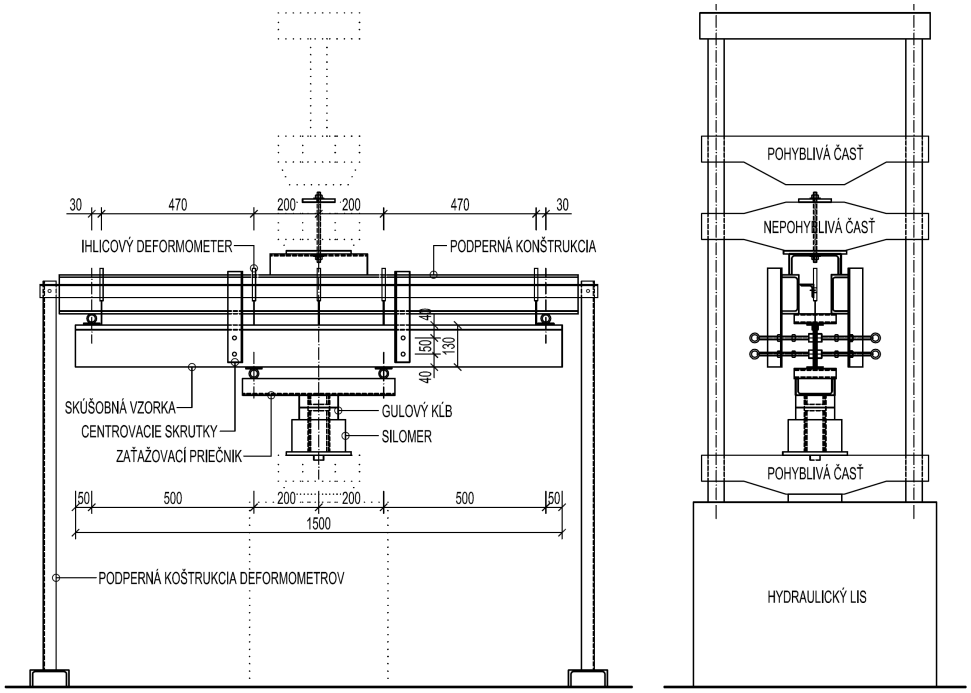
Obr. 1.1 – Nalepená výstužná pásovina (detail), schéma a skutočné prevedenie

* Miloš, Slivanský, Ing., STU Bratislava, Stavebná fakulta, KKDK, milos.slivansky@stuba.sk

Skúšobné vzorky sklených nosníkov mali rozmery 1500 x 130mm a na ich výrobu boli použité tabule vrstveného skla (nekaleného alebo plne kaleného) s hrúbkou 5mm, ktoré boli vzájomne spojené PVB fóliou s hrúbkou 0,76mm. Teoretická hrúbka vrstvenej sklenej tabule bola teda 10,76mm. Ako výstužný profil sa použil nerezový pásový materiál kvality EN 1.4301, resp. STN 17 240. Strihaná pásovina s prierezom 15 x 3mm bola nalepená no obidva povrchy sklenej tabule pozdĺž celého nosníka na jednom jeho okraji (pri zaťažení na ťahanom okraji). Detail nosníka s nalepenou výstužnou páskou ilustruje obr. 1.1. Na lepenie výstužnej pásky sa použilo dvojzložkové epoxidové lepidlo na všeobecné použitie Loctite Hysol 9466.

1.1 Príprava experimentu

Skúšobné vzorky všetkých typov nosníkov boli overované 4 – bodovou ohybovou skúškou. Pri celkovej dĺžke nosníkov 1500mm bola teoretická vzdialenosť koncových podpier nosníkov 1400mm. Vzorky boli zaťažované symetricky v 2 bodoch vo vzdialenosti 200mm okolo stredu ich rozpätia. Celková vzdialenosť podpier zaťažovacieho priečnika bola teda 400mm. Aby bolo možné vykonávať opakované skúšky sklených nosníkov, bola navrhnutá a vyrobená skúšobná zaťažovacia zostava, ktorá bola osadená v stacionárnom hydraulickom lise ZDMU 30 s maximálnou zaťažovacou silou 100kN (obr. 1.2).



Obr. 1.2 – Zaťažovacia zostava, schéma a osadenie v hydraulickom lise

Správanie skúšobných vzoriek pri zaťažovaní bolo zaznamenávané pomocou meracej stanice od firmy HBM Spider8, ktorá prenášala a zaznamenávala namerané údaje prostredníctvom napojenia na prenosné PC cez obslužný softvér CatMan. Namerané údaje boli po ukončení merania exportované do súborov formátu Microsoft Excel. Pri overovaní sklených nosníkov boli merané tieto veličiny:

- zvislé deformácie skúšobnej vzorky 5x
- vodorovná deformácia skúšobnej vzorky 1x
- meranie dráhy posunu lisu 1x

- zaťažovacia sila 1x
- meranie pomerných deformácií skúšobnej vzorky 4x

2. VYHODNOTENIE MERANÍ A PREHĽAD DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

Celkovo bolo v laboratóriu KKDK na STU v Bratislave odskúšaných 16 vzoriek sklených nosníkov. Skúšobné vzorky boli rozdelené podľa druhu skla (plavené sklo ANG alebo plne kalené sklo FTG) a typu nosníka (nevystužený alebo vystužený = Reinforced) do 4 základných skupín.

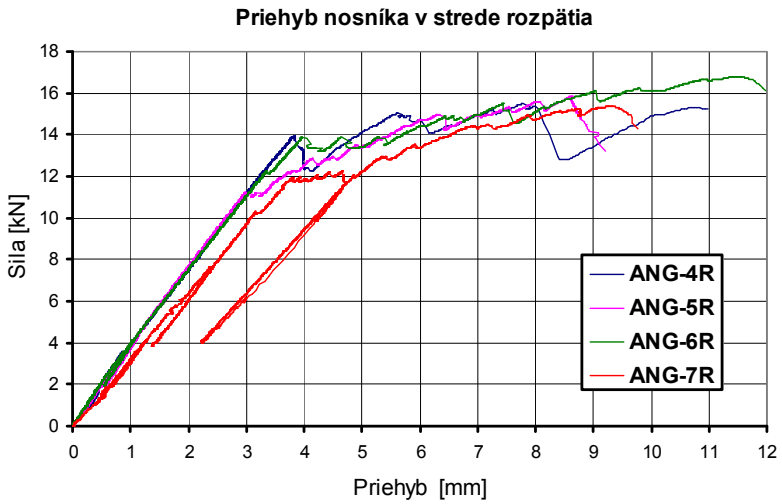
2.1 Skúšky nevystužených nosníkov

Krehký charakter porušovania sklených prvkov sa pri oboch typoch nosníkov prejavil totálnym kolapsom vzorky, ktorému nepredchádzal žiadny pozorovateľný rozvoj trhlín a nosník sa porušil náhle, resp. okamžite. Pri nosníkoch z plaveného skla malo výsledné poškodenie lokálny charakter (jedna trhlina a neporušené kompaktné časti), pri nosníkoch z kaleného skla sa vplyvom kalenia porušené vrstvy skla rozpadli na množstvo drobných častí a drobné úlomky boli vymrštené do okolia do značnej vzdialenosti. Porušené vzorky nevykazovali žiadnu zvyškovú odolnosť, aj keď zostali jednotlivé časti spojené PVB fóliou.

Obr. 2.1 – Typický charakter porušenia vzoriek ANG (vľavo) a vzoriek FTG (vpravo)

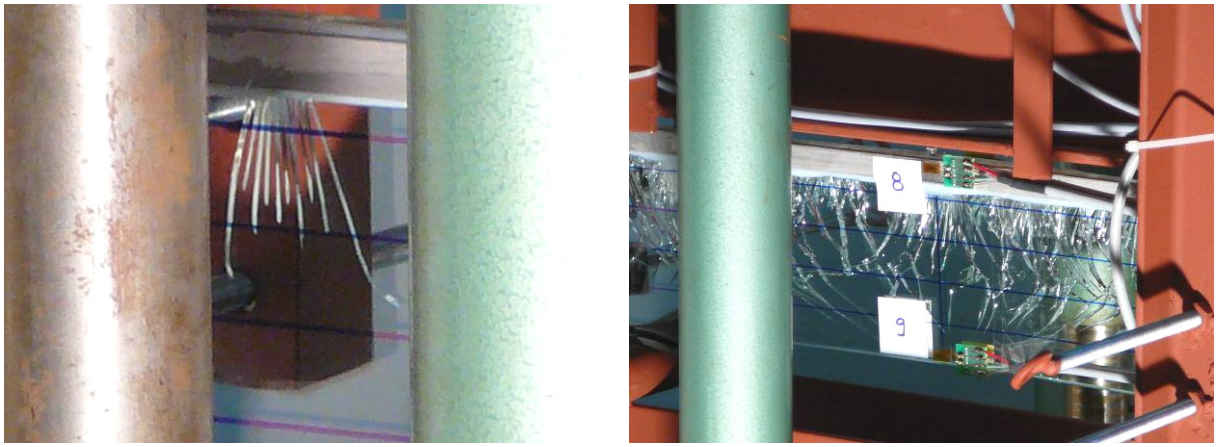
2.2 Skúšky vystužených nosníkov z plaveného skla

Skúšky vystužených nosníkov z plaveného skla boli hlavnou oblasťou uskutočneného experimentálneho výskumu. Z výsledkov meraní vyplýva, že závislosť medzi zaťažením a zvislým priehybom je do vzniku trhlín takmer ideálne lineárna. Zväčšovaním rozsahu poškodenia nosníka trhlinami klesá jeho výsledná ohybová tuhosť a narastá zvislý priehyb nosníka. Z pohľadu celkovej odolnosti sa pôvodný krehký charakter porušenia sklených nosníkov vplyvom vystuženia ťahaného okraja zmenil na pretvárny (plastický), ktorý sa prejavuje postupným poklesom ohybovej tuhosti nosníka. Pokles ohybovej tuhosti vystuženého nosníka je spôsobený dvoma hlavnými faktormi – vznikom a rozvojom ťahových trhlín v sklenej časti a plastizáciou výstužnej pásky v trhline.



Obr. 2.2 – Grafy závislosti *P* – *w* nosníkov ANG-R

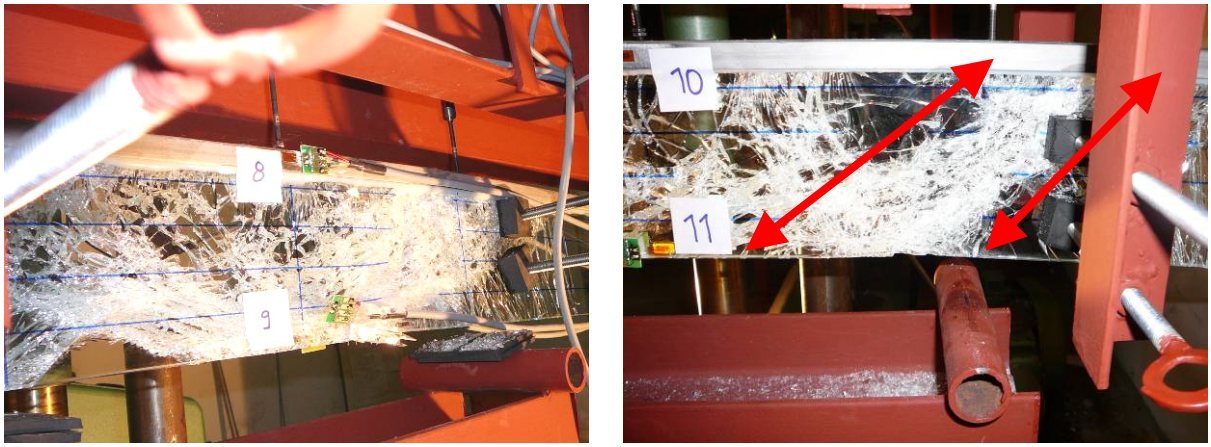
Všetky vystužené nosníky z plaveného skla boli po vzniku trhliny ďalej schopné prenášať narastajúce zaťaženie a ani v jednom prípade nedošlo ku kolapsu nosníka po vzniku prvej trhliny. Počiatočné porušenie nosníka nastalo vznikom trhliny na ťahanom okraji. Trhliny mali mierne rozvetvený tvar a boli orientované kolmo na okraj nosníka. Vznikali v oboch vrstvách skla takmer súčasne, vo väčšine prípadov v oblasti maximálneho ohybového momentu. Dĺžka trhlín bola spočiatku obmedzená maximálne 3/5 celkovej výšky prierezu nosníka. Nosník bol schopný ďalej prenášať narastajúce zaťaženie a dochádzalo k vzniku alebo vetveniu nových trhlín.



Obr. 2.3 – Počiatočné trhliny a ich rozvoj pred totálnym porušením vzorky

V štádiu pred porušením nosníka sa mechanizmus rozvoja trhlín odlišoval podľa toho, či sa skúmalo porušenie skupiny nosníkov bez alebo s doplnenou stabilizáciou tlačeného okraja. Pri nosníkoch bez doplnenej stabilizácie dochádzalo k rozvoju trhlín výrazne šikmým smerom, trhliny sa vzájomne prepojili, postupne rozšírili k tlačenému okraju a nastalo vybočenie tlačeného okraja nosníka do strany. Nasledoval finálny kolaps, tlačená oblasť nosníka „explodovala“. Pri nosníkoch s doplnenou stabilizáciou sa trhliny k tlačenému okraju šírili nepravidelne. Finálny kolaps nosníka nastal následkom vybočenia tlačeného okraja medzi doplnenými bočnými podperami alebo došlo k sformovaniu výraznej šikmej trhliny v mieste podpery zaťažovacieho priečnika. Šikmá trhlina so sklonom približne 45° až 60°

prechádzala oboma vrstvami skla naprieč celou výškou prierezu nosníka. Vzhľadom na charakter a polohu trhliny je pravdepodobné, že o výslednej odolnosti nosníka rozhodlo namáhanie priečnou silou.



Obr. 2.4 – Totálny kolaps nosníka spôsobený vybočením tlačeného okraja (vľavo) a kolaps nosníka spôsobený šikmou trhlinou (vpravo)

V oboch prípadoch poškodený nosník nebol schopný prenášať akékoľvek zaťaženie. Okrajové časti nosníka zostali kompaktné a vo väčšine prípadov boli poškodené trhlinami iba v minimálnom rozsahu. Pri finálnom kolapse niektorých nosníkov došlo k trvalej deformácii a čiastočnému odlepeniu výstužnej pásky. Hodnoty totálnych odolností vystužených nosníkov z plaveného skla majú pomerne malý rozptyl bez ohľadu na skutočnosť, či došlo k výslednému kolapsu nosníka stratou stability alebo vznikom šikmej trhliny pri podpere zaťažovacieho priečnika.

2.3 Skúšky vystužených nosníkov z plne kaleného skla

Pred vznikom trhliny sa vystužené nosníky správali rovnako ako nosníky z plaveného skla. Pri vzniku trhliny sa vrstvy skla okamžite rozpadli na množstvo drobných častí a k redistribúcii namáhania medzi tlačenú sklenú časť a výstužnú pásku nedošlo. Finálnemu porušeniu nosníkov nepredchádzal žiadny pozorovateľný rozvoj trhlín a celkové zlyhanie bolo náhle, rovnaké ako pri nevystužených nosníkoch z plne kaleného skla.

Z výsledkov experimentálneho výskumu na odskúšaných typoch sklených nosníkov je možné formulovať nasledujúce závery:

- potvrdil sa krehký charakter porušovania sklených prvkov;
- potvrdil sa vplyv tepelnej úpravy (kalenia) na pevnosť skla v ťahu; nosníky z kaleného skla dosahovali približne 2,5 až 4,5 násobnú odolnosť oproti nosníkom z plaveného skla;
- namerané hodnoty Youngovho modulu pružnosti zodpovedajú hodnote 70GPa;
- experimenty upozornili na stabilitné problémy nosníkov spojené s klopením a potvrdil sa pozitívny vplyv stabilizácie tlačeného okraja;
- spolupôsobenie skla s výstužným profilom prostredníctvom epoxidového lepidla sa preukázalo ako dostatočné;
- estetické prevedenie zlepového spoja neruší vzhľad prvku;
- technológia výroby vystužených nosníkov je pomerne nenáročná;

- výsledná odolnosť vystužených nosníkov z plaveného skla je 2,5 až 4 – násobná vzhľadom na odolnosti nevystužených nosníkov z plaveného skla;
- pri porovnaní zvýšenia odolnosti nosníka pred vznikom trhliny, dosahovali vystužené nosníky z plaveného skla 1,7 až 3,3 – násobnú odolnosť vzhľadom na nevystužené nosníky z plaveného skla, ale iba 50 až 100% odolnosť v porovnaní s nevystuženými nosníkmi z plne kaleného skla;
- z hľadiska zabezpečenia zvyškovej odolnosti bola pri vystužených nosníkoch z plaveného skla dosiahnutá 100% úspešnosť a pri žiadnom nosníku nedošlo ku kolapsu po vzniku prvej trhliny;
- pri vzniku trhliny dochádza k prerozdeleniu namáhania a výraznejší je nárast normálových napätí vo výstuži;
- krehký charakter porušovania sklených nosníkov sa zmenil na pretvárny (plastický), čo sa prejavuje poklesom ohybovej tuhosti nosníka;
- pokles ohybovej tuhosti je spôsobený zväčšovaním rozsahu poškodenia sklenej časti trhlinami, významnú úlohu zohráva aj plastizácia výstuže;
- ani v jednom prípade nespôsobilo kolaps odlepenie, alebo pretrhnutie výstuže, nosníky sa porušili vplyvom zlyhania sklenej časti;
- použitie vystuženia v kombinácii s plne kaleným sklom je neefektívne a nemá praktický význam;
- krehký charakter porušenia vystužených nosníkov z plne kaleného skla;
- zvýšenie odolnosti vystužených nosníkov z plne kaleného skla vzhľadom na rovnaké nevystužené nosníky bolo pri experimente zanedbateľné (do 10%);
- výsledná odolnosť vystužených nosníkov z plne kaleného skla vzhľadom na vystužené nosníky z plaveného skla bola o 30% vyššia (vplyv kalenia).

3. ZÁVER

Sklené nosníky predstavujú pomerne málo preskúmanú oblasť nosných konštrukcií. Vykonaný experimentálny výskum preukázal, že spoľahlivosť sklených konštrukcií sa dá kombináciou s kovovými materiálmi niekoľkonásobne zvýšiť. Vystuženie skleného prierezu nerezovým profilom nalepeným na povrchu skla predstavuje veľmi významné zlepšenie celkovej odolnosti nosného prvku. Pri aplikácii výstužného profilu nejde o technologicky náročný proces a výsledné riešenie podstatne neovplyvňuje ani cenu, ani estetický vzhľad vytvoreného prvku. Nepredvídateľný a nebezpečný krehký charakter porušovania sklených prvkov sa po vystužení mení na pretvárny. Pred totálnym porušením vystuženého prvku sa dá pozorovať viditeľné poškodenie sklenej časti a výrazný nárast deformácií. Na základe získaných výsledkov je možné konštatovať, že vystužovanie nosníkov z plne kaleného skla nemá praktický význam, pretože pri počiatočnom vzniku trhliny dochádza k trieštivému rozpadu skla na drobné časti a zlyhanie nosníka je náhle, resp. rovnaké ako pri nevystuženom nosníku.

LITERATÚRA

[1] Slivanský, M.: Experimentálne a teoretické overovanie odolnosti sklených nosníkov. Dizertačná práca SvF – 3237 – 3702, Stavebná fakulta, STU Bratislava 2010.