

Vedecká rada Stavebnej fakulty  
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

**Ing. Miloš Slivanský**

Autoreferát dizertačnej práce

**EXPERIMENTÁLNE A TEORETICKÉ OVEROVANIE  
ODOLNOSTI SKLENÝCH NOSNÍKOV**

**na získanie** vedecko – akademickej hodnosti philosophiae doctor

**v odbore doktorandského štúdia:**

36 – 02 – 9            Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

**v špecializácii:**    Kovové a drevené konštrukcie

**Miesto a dátum:** Bratislava jún 2010

**Dizertačná práca bola vypracovaná** v externej forme doktorandského štúdia na Katedre kovových a drevených konštrukcií Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

**Predkladateľ:** Ing. Miloš Slivanský  
Katedra kovových a drevených konštrukcií  
Stavebná fakulta STU  
Radlinského 11  
813 68 Bratislava

**Školiteľ:** Doc. Ing. Ján Brodniansky, PhD.  
Katedra kovových a drevených konštrukcií  
Stavebná fakulta STU  
Radlinského 11  
813 68 Bratislava

**Oponenti:** Prof. Ing. Stanislav Kmeť, PhD.  
Katedra kovových a drevených konštrukcií  
Ústav inžinierskeho staviteľstva  
Stavebná fakulta  
Technická univerzita v Košiciach

Doc. Ing. Marcela Karmazínová, CSc.  
Ústav kovových a drevených konštrukcií  
Fakulta stavební  
Vysoké učení technické v Brně

Ing. Martina Eliášová, CSc.  
Katedra ocelových a drevených konštrukcií  
Fakulta stavební  
České vysoké učení technické v Praze

**Autoreferát bol rozoslaný dňa** .....

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa** ..... **o** ..... **hod.**  
**pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia**  
**vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa** .....  
**na Stavebnej fakulte STU v Bratislave.**

36 – 02 – 9 Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

**špecializácia:** Kovové a drevené konštrukcie

**Predseda spoločnej odborovej komisie:**

Prof. Ing. Peter Turček, PhD.

Predseda SOK

36 – 02 – 9 Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

Stavebná fakulta STU

813 68 Bratislava

## 1 ÚVOD

Za posledných dvadsať rokov došlo v stavebníctve k výraznému rozvoju v aplikácii sklenených prvkov a konštrukčných dielcov. Namiesto tabúl' podopieraných nosnou konštrukciou z ocele, hliníka alebo dreva sa rozšírilo využívanie samonosných sklenených konštrukcií. Z estetického hľadiska vznikli absolútne transparentné konštrukcie, ale zároveň sa objavilo aj množstvo problémov, pre ktoré je z hľadiska komplexného konštrukčného návrhu potrebné hľadať riešenia.

Experimentálny výskum v oblasti konštrukčného skla na našom území, resp. území Slovenskej republiky a Českej republiky, má pomerne krátku históriu. Problematikou v oblasti výskumu nosných konštrukcií zo skla sa predovšetkým zaoberali pracovníci Ústavu kovových a drevených konštrukcií na Stavebnej fakulte ČVUT v Brne, J. Melcher a M. Karmazínová, a pracovníci Katedry kovových a drevených konštrukcií na Stavebnej fakulte STU v Bratislave, J. Brodniansky, R. Ároch a P. Mališ.

Predložená práca sa zaoberá problematikou poznania základných mechanických vlastností skla ako konštrukčného materiálu a aplikáciou získaných vedomostí pri reálnom návrhu nosných prvkov. Hlavným cieľom práce je skúmanie odolnosti nosníkov z vrstveného plaveného a kaleného skla z pohľadu zvýšenia únosnosti s využitím spolupôsobenia skla s oceľovými prvkami a tiež z pohľadu zabezpečenia zvyškovej odolnosti porušeného skleneného prvku. Ťažiskom práce je predovšetkým zrealizovaný experimentálny výskum a výsledky získané na základe zostavených výpočtových modelov. Spracovaný experimentálny výskum čiastočne nadväzuje na práce uskutočnené v zahraničí.

## 2 OBSAH DIZERTAČNEJ PRÁCE

### ZOZNAM POUŽITÝCH ZNAČIEK A SYMBOLOV

### PREDSLOV

### ANOTÁCIA

### ANNOTATION

- 1 HISTORICKÝ PREHĽAD
  - 1.1 História výroby skla
  - 1.2 Použitie skla v stavebníctve
  - 1.3 Vedecký výskum
- 2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE
- 3 CHEMICKÉ ZLOŽENIE A FYZIKÁLNE VLASTNOSTI SKLA
  - 3.1 Chemické zloženie skla
  - 3.2 Fyzikálne vlastnosti skla
- 4 SKLO V STAVEBNÍCTVE
  - 4.1 Výroba plochého skla
  - 4.2 Výroba liateho skla a sklenených profilov
  - 4.3 Spracovanie skla
- 5 NAVRHOVANIE NOSNÝCH KONŠTRUKCIÍ ZO SKLA
  - 5.1 Zvyšková odolnosť porušeného skleneného prvku
  - 5.2 Statická analýza a modelovanie
  - 5.3 Mikroštruktúra a lomové vlastnosti skla
  - 5.4 Návrhové metódy
- 6 VYSTUŽENÉ SKLENÉ NOSNÍKY, PODSTATA PROBLEMATIKY
  - 6.1 Úvod
  - 6.2 Sklené nosníky vystužené oceľovými pásmi, teoretický model
  - 6.3 Mechanizmus porušovania

6.4	Aspekty navrhovania vystužených sklenených nosníkov
7	EXPERIMENTÁLNE OVEROVANIE SKLENÝCH NOSNÍKOV
7.1	Skúmané typy nosníkov, materiál a geometria
7.2	Skúšky materiálov
7.3	Príprava experimentu
8	PRIEBEH A VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ
8.1	Skúšky nevystužených nosníkov z plaveného skla (ANG)
8.2	Skúšky nevystužených nosníkov z plne kaleného skla (FTG)
8.3	Skúšky vystužených nosníkov z plaveného skla (ANG-R)
8.4	Skúšky vystužených nosníkov z plne kaleného skla (FTG-R)
9	PREHĽAD DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV
9.1	Experimentálne merania na overenie mechanických vlastností materiálu
9.2	Experimentálne overovanie spolupôsobenia skla s kovovými materiálmi
9.3	Návrh zlepšení a úprav overovaných sústav
9.4	Aplikácia teoretických modelov a porovnanie výsledkov
10	FORMULÁCIA ZÁVEROV PRE TEORETICKÝ PRÍNOS A VYUŽITIE V PRAXI
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY
	PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA
	Práce súvisiace s problematikou konštrukčného skla
	Ostatné publikované práce

### **3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE**

V písomnej časti referátu k dizertačnej skúške boli komisiou schválené uvedené tézy:

- experimentálne merania na doplnenie a overenie základných mechanických vlastností materiálu;
- vyhodnotenie efektívnosti experimentálne overovaných konštrukčných sústav vytvorených na báze spolupôsobenia skla s kovovými materiálmi;
- návrh zlepšení a úprav overovaných sústav;
- aplikácia teoretických modelov a porovnanie výsledkov vzhľadom na vykonaný experimentálny výskum;
- formulácia záverov pre teoretický prínos a využitie v praxi.

### **4 NAVRHOVANIE NOSNÝCH KONŠTRUKCIÍ ZO SKLA**

Pri použití skla ako konštrukčného materiálu sa stretávame so špecifickými problémami. Sklené prvky sú veľmi citlivé na koncentrácie napätí a porušujú sa bez toho, aby bolo možné poruchu prvku predvídať. Podstata krehkého pôsobenia je rozhodujúca pri návrhu sklenených prvkov a ich prípojov. Nepredvídateľným návrhovým situáciám je potrebné predchádzať podrobnou analýzou možných modelov pôsobenia nosnej konštrukcie a podmienok okolitého prostredia vplývajúcich na jej zaťaženie a životnosť.

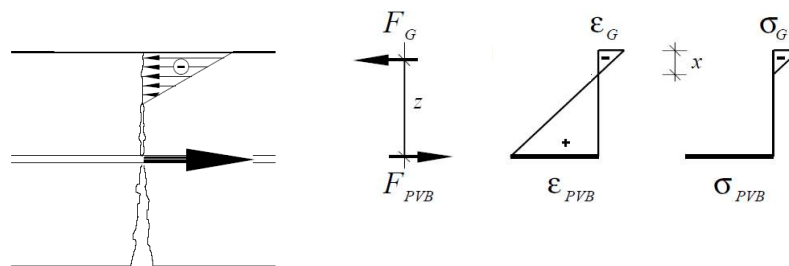
Navrhovanie nosných konštrukcií zo skla sa vo veľkej miere opiera o empirické poznatky, podrobnejšie analytické metódy a nie zriedka je rozhodujúci aj experimentálny výskum. Navrhnutá sklená konštrukcia by mala v bežných prípadoch spĺňať požiadavky medzného stavu únosnosti a medzného stavu použiteľnosti. Medzný stav únosnosti musí byť preukázaný dostatočnou pevnosťou materiálu vzhľadom na napätosť konštrukcie a

zabezpečením stability jednotlivých častí, resp. zabezpečením stability konštrukčného systému ako celku. Sklené konštrukcie musia navyše spĺňať bezpečnostné požiadavky týkajúce sa zvyškovej odolnosti porušeného skleneného prvku.

#### 4.1 Zvyšková odolnosť porušeného skleneného prvku

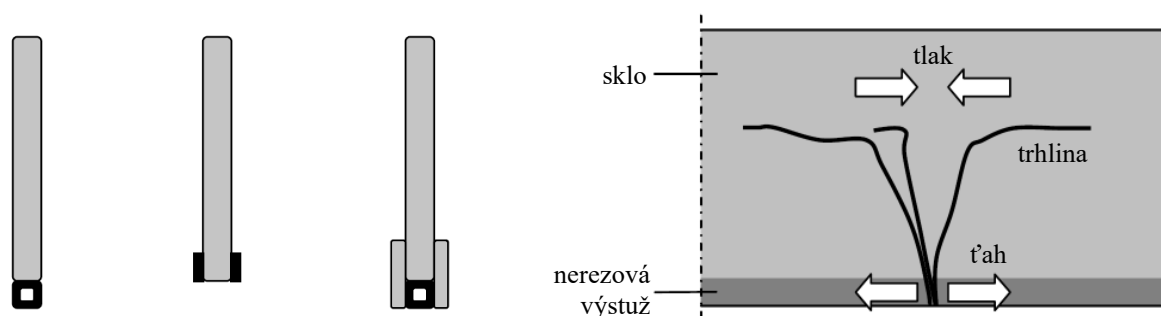
Zvyškovú odolnosť porušeného skleneného prvku je možné posudzovať na úrovni samostatného porušeného prvku alebo na úrovni celého nosného systému, resp. konštrukcie. Sklo nemá vlastnú schopnosť porušovať sa plasticky a pri vzniku významnejšej poruchy sa okamžite rozpadne na množstvo menších nepravidelných častí. Znamená to, že akúkoľvek zvyškovú odolnosť je možné docieľiť iba dodatočnými spôsobmi.

Vrstvené sklo je schopné naplniť požiadavky zvyškovej odolnosti poškodeného panelu spolupôsobením PVB fólie s úlomkami skla pri splnení určitých okrajových podmienok týkajúcich sa hlavne podopretia a skladby vrstveného panelu. Ak vrstvený panel pozostáva z tabúl plne kaleného skla, je najčastejšie rozhodujúcim faktorom ťahová pevnosť PVB fólie a spôsob podopretia panelu. Plne kalené sklo sa pri porušení rozpadne na veľké množstvo drobných častí. Na prenose zaťaženia sa ďalej podieľa len PVB fólia, ktorá sa správa ako tenká membrána bez ohybovej tuhosti. Vyčerpanie zvyškovej odolnosti je najčastejšie spôsobené zošmyknutím porušeného panelu z podpernej konštrukcie alebo poškodením PVB fólie vplyvom vzniknutých membránových síl. Pri použití nekaleného alebo čiastočne kaleného skla je možné uvažovať pri posudzovaní poškodeného vrstveného panelu s prenosom zaťaženia ohybovou tuhosťou zloženého systému. Túto situáciu ilustruje obr. 4.1.



Obr. 4.1 – Mechanizmus prenosu zaťaženia pri porušenom vrstvenom skle (Kott, 2003)

Obidve vrstvy skla môžu byť síce porušené, ale fragmenty skla vo vrchnej vrstve sú vzájomne k sebe pritláčané a vytvárajú tlakovú zónu, ktorá v kombinácii s ťahovými napätiami v PVB fólii zabezpečuje zvyškovú odolnosť porušeného vrstveného panelu. Takáto zvyšková odolnosť je závislá od tuhosti, ťahovej pevnosti medzivrstvy a typu použitého skla. Je veľmi dôležité, aby v tlačenej zóne nevznikali drobné úlomky, ale väčšie časti, ktoré sa neoddeľujú od materiálu medzivrstvy (nekalené alebo čiastočne kalené sklo).

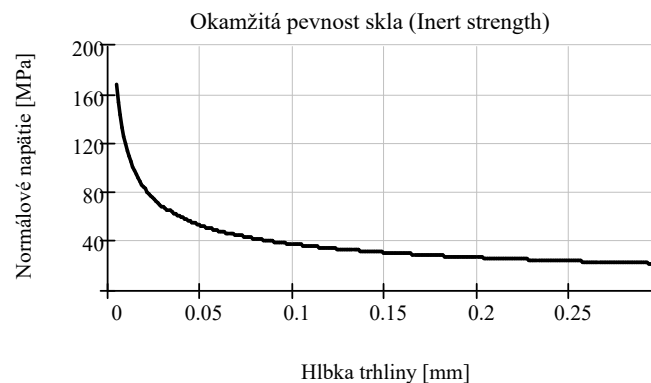


Obr. 4.2 – Sklený nosník vystužený oceľovým profilom (Louter, 2007)

Alternatívne spôsoby zlepšenia zvyškovej odolnosti sklenených prvkov sú založené na podobnom princípe. Používajú sa oceľové, prípadne nerezové výstužné pásy alebo karbónové vlákna, ktoré spolu so skleneným prvkom vytvárajú zložený (kompozitný) nosný systém (obr. 4.2). Rozhodujúcimi faktormi pre dosiahnutie požadovanej zvyškovej odolnosti sú pevnosť a spôsob pripojenia výstužných častí na sklený prvok.

## 4.2 Mikroštruktúra a lomové vlastnosti skla

Pri návrhu sklenených prvkov je nevyhnutné poznať podstatu mechanizmu porušenia skleneného materiálu a všetky faktory ovplyvňujúce odolnosť, resp. celkovú životnosť skleneného prvku alebo konštrukcie. Sklo je konštrukčný materiál, ktorý nemá pravidelnú kryštalickú štruktúru. Pozostáva z nepravidelných reťazcov častíc kremíka, kyslíka a alkalických látok (vápnik, sodík). Nepravidelná molekulová štruktúra neumožňuje vznik šmykových plôch, a preto nedochádza pred porušením skla k plastizácii materiálu. Sklo sa správa pri bežných teplotách takmer dokonale elasticky, porušuje sa krehkým lomom a je citlivé na koncentrácie napätí. Najväčšie koncentrácie napätí vznikajú v okolí trhlín a škrabancov. Výskumy preukázali, že pevnostné charakteristiky skla priamo súvisia s intenzitou a rozložením trhlín na povrchu alebo okrajoch skleneného prvku. Preto je pri analýze porušenia sklenených prvkov možné využívať lineárne – elastickú lomovú mechaniku, ktorá sa zaoberá metódami stanovenia lomovej pevnosti krehkých materiálov.



Obr. 4.3 – Okamžitá pevnosť skla ako funkcia hĺbky trhliny

Vo vákuu je pevnosť skla teoreticky nezávislá od času. V bežných podmienkach okolitého prostredia, v prítomnosti vlhkosti, dochádza ku korózii povrchu skla. Korózia skla spôsobuje postupný rozvoj (zväčšovanie hĺbky) trhliny vystavenej ťahovému napätiu. Sklený prvok, ktorý je namáhaný napätím menším, ako je jeho okamžitá pevnosť, sa preto môže porušiť po uplynutí určitej doby, počas ktorej dôjde postupným rozvojom povrchovej trhliny ku sfornovaniu trhliny s kritickou hĺbkou. Pri zaťažení sa pevnosť skla teda s časom znižuje, čo je veľmi dôležité zohľadniť pri praktickom navrhovaní sklenených prvkov. Postupný rozvoj (nárast) trhliny ovplyvňuje niekoľko faktorov. Medzi najpodstatnejšie patria vlastnosti skla a trhliny, história napätia v okolí sledovanej trhliny a podmienky okolitého prostredia (teplota, vlhkosť a pod.).

## 4.3 Návrhové metódy

Metódy navrhovania sklenených konštrukcií je možné rozdeliť podľa podstaty posudzovania do troch hlavných skupín. Prvou skupinou sú metódy čerpajúce predovšetkým z empirických skúseností, druhou skupinou sú metódy založené na posudzovaní odolnosti konštrukcií podľa dovolených namáhání a treťou skupinou sú návrhové metódy, ktoré využívajú teóriu lomovej mechaniky a štatistického rozdelenia pravdepodobnosti porušenia

sklených prvkov. Poslednú skupinu je možné deliť podľa toho, či ide o metódy používané v Európe alebo v USA (ASTM E 1300-03, ASTM E 1300-04, ASTM E 1300-94), resp. Kanade (CAN/CGSB 12.20-M89).

### **Empirické návrhové metódy**

Empirické metódy predstavujú užitočný prostriedok pre návrh sklených prvkov. Väčšina týchto metód je v súčasnej dobe prekonaná a obmedzená iba na základné návrhové situácie. Preto by nemali nahrádzať detailný návrh zohľadňujúci špecifické požiadavky, ktoré vyplývajú z tvaru, okrajových podmienok a zaťaženia skleného prvku. Používajú sa predovšetkým pri návrhu predbežných dimenzií prvkov alebo ako hrubá kontrola výsledkov dosiahnutých niektorou z presnejších metód.

### **Metóda dovolených namáhání**

Metóda dovolených namáhání je stále veľmi rozšírená pri navrhovaní sklených prvkov. Odolnosť prvku sa posudzuje na základe porovnania maximálnych napätí od najnepriaznivejšej kombinácie vonkajších zaťažení a tzv. dovolených namáhání. Dovoľené namáhanie predstavuje pevnosť materiálu určenú na základe experimentálnych meraní redukovanú príslušným globálnym faktorom bezpečnosti.

### **Európske normy**

V súčasnej dobe existuje pomerne rozsiahla predbežná európska norma pre posúdenie odolnosti sklených konštrukcií a prvkov prEN 13474. Spracované sú zatiaľ dve časti, ktoré sa venujú posúdeniu odolnosti plošných prvkov, prEN 13474-1:1999 Glass in building – Design of glass panes – Part 1: General basis of design a prEN 13474-2:2000 Glass in building – Design of glass panes – Part 2: Design for uniformly distributed load. Norma prEN 13474 zatiaľ nie je súčasťou balíka výsledných európskych noriem (EC). Navrhovaná norma je kompatibilná s ostatnými európskymi normami, pretože využíva metodiku medzných stavov a parciálnych súčiniteľov spoľahlivosti. Využíva tiež princípy lomovej mechaniky v kombinácii so štatistickým rozdelením pravdepodobnosti pomocou Weibullovej distribučnej funkcie, čo umožňuje zohľadniť špecifické podmienky, ktoré ovplyvňujú návrh a životnosť sklených prvkov. V zmysle normy prEN 13474 je možné tieto podmienky rozdeliť na vplyv rozloženia napätia na povrchu skleného prvku, vplyv dodatočnej úpravy skla (kalenie), vplyv dĺžky trvania zaťaženia a vplyv veľkosti posudzovaného prvku.

Vplyv rozloženia napätia na povrchu skleného prvku je započítaný na strane namáhania, ostatné podmienky pôsobenia sú započítané na strane odolnosti materiálu. Posúdenie odolnosti skleného prvku sa overuje porovnaním tzv. efektívneho návrhového napätia  $\sigma_{eff,d}$  s návrhovou pevnosťou materiálu  $f_{g,d}$ .

Súčasný stavebný trend vyžaduje navrhovanie moderných sklených konštrukcií. Sklené nosníky, stĺpy, prvky zložené z viacerých materiálov a hybridné konštrukcie sú čím ďalej viac rozšírenými oblasťami využitia konštrukčného skla. Z praktického hľadiska je preto najväčšou nevýhodou, že v uvedenej predbežnej norme nie je rozpracované navrhovanie iných ako doskových prvkov. Absenciu dostatočného teoretického pozadia musí preto zatiaľ nahrádzať experimentálny a teoretický výskum skutočných konštrukcií.

## **5 VYSTUŽENÉ SKLENÉ NOSNÍKY, PODSTATA PROBLEMATIKY**

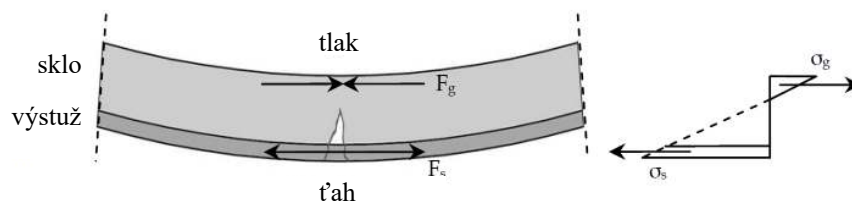
Nepredvídateľný a veľmi krehký charakter porušenia je najväčšou nevýhodou pri využívaní skla ako konštrukčného materiálu. Plastický (pretvárny) charakter porušovania je možné dosiahnuť iba kombinovaním skla s inými materiálmi. Najčastejšie sa na tento účel používajú oceľové profily alebo karbónové vlákna. Spolu so skleným prvkom vytvárajú

kompozitný nosný systém. Pri poškodení skla v oblasti ťahových napätí dochádza k redistribúcii vnútorných síl medzi sklené časti a výstužný prvok. Následkom poškodenia skleneného prvku nie je krehké porušenie a náhly kolaps, ale zmena jeho statického pôsobenia.

Vývoj v oblasti navrhovania sklenených nosníkov sa spočiatku uberal odlišným smerom. Zvyšovanie odolnosti sklenených prvkov sa najčastejšie realizovalo vrstvením skiel pomocou PVB fólie. Podstata zvýšenia bezpečnosti spočívala v predimenzovaní konštrukcie. Do celkovej únosnosti prvku sa vonkajšie vrstvy skla obvykle nezapočítavali, ale tvorili len obal vnútorných (nosných) častí prierezu (Louter, 2007). Za zvýšenie odolnosti sa tiež považovala schopnosť vrstveného prvku odolávať zníženej hladine namáhania pri poškodení niektorej vrstvy skla (Bos, 2007). Zvyčajne sa používalo plne kalené sklo, pretože v dôsledku tepelnej úpravy vykazuje vyššie pevnosti v ťahu. Napriek spomenutým konštrukčným úpravám stále existovalo riziko náhleho porušenia v dôsledku opakovaného mechanického poškodenia alebo vplyvom nepredpokladaných koncentrácií napätia v oblasti podpier, stykov a prípojev.

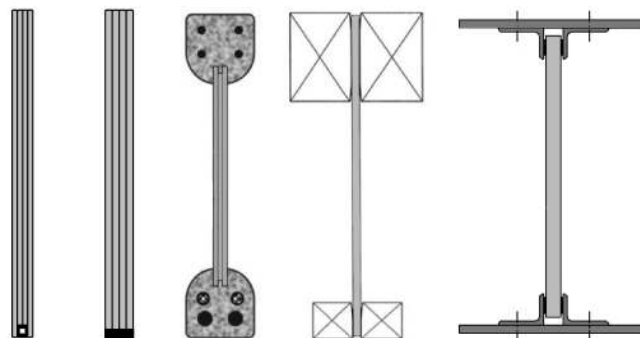
Využívanie vrstveného skla v konštrukcii sklenených nosníkov má svoje výhody aj z pohľadu štatistického rozdelenia pravdepodobnosti porušenia. Štatisticky je odolnosť dvoch nosníkov väčšia (alebo minimálne rovnaká) ako dvojnásobok odolnosti jedného nosníka. Preto majú dva nosníky s polovičnou hrúbkou štatisticky vyššiu odolnosť ako samostatný nosník s dvojnásobnou hrúbkou. Najväčšie rozdiely sú badateľné pri veľmi nízkych pravdepodobnostiach porušenia prvku (Crompton, 1999).

Koncept vystužených sklenených nosníkov sa (namiesto minimalizovania rizika náhleho porušenia skleneného prvku) sústreďuje na spôsoby zabezpečenia plastického charakteru výsledného porušenia. Použitie výstužných profilov pozdĺž ťahaného okraja skleneného nosníka je jednou z týchto možností.



Obr. 5.1 – Podstata prerozdelenia namáhania vo vystužených sklenených nosníkoch (Louter, 2007)

Prekročením odolnosti sklenej časti dôjde k vzniku ťahovej trhliny, ale jej rozvoj bude obmedzený. Energia lomu sa čiastočne spotrebuje na deformáciu výstuže, ktorá v mieste trhliny prevezme ťahové sily. Spolu s tlakovými silami v nepoškodenej časti skleneného prierezu vznikne dvojica síl, vďaka ktorej je vystužený nosník naďalej schopný prenášať zaťaženie (obr. 5.1).



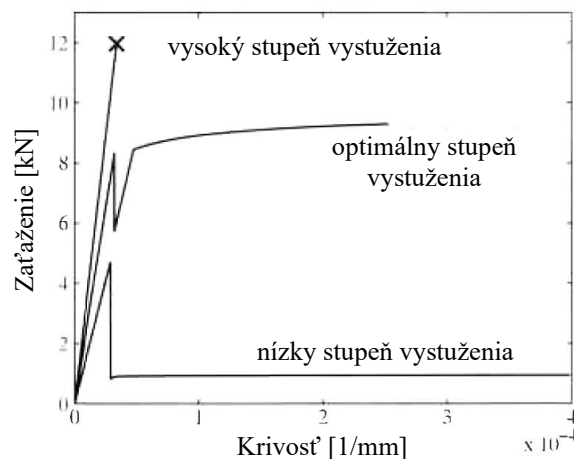
Obr. 5.2 – Výskum v zahraničí (Louter, 2007)



V zahraničí bolo vykonaných niekoľko výskumných projektov venovaných problematike vystužených, resp. kompozitných sklených nosníkov. Okrem vystužovania oceľovými profilmi sa výskumníci zaoberali aj kombinovaním skla s inými materiálmi. Stručný prehľad najaktuálnejších prác je uvedený na obr. 5.2. Patria sem sklené nosníky vystužené oceľovými pásmi alebo profilmi (Louter, 2007; Ølgaard, 2008), sklené nosníky vystužené karbónovými pásmi (Palumbo, 2005), sklobetónové kompozitné nosníky (Freytag, 2004), sklodrevené kompozitné nosníky (Kreher, 2004; Hamm, 2000) a tiež sklené nosníky s oceľovou pásnicou (Wellershof, 2003; Flinterhoff, 2003; Grotepaß, 2006).

### 5.1 Sklené nosníky vystužené oceľovými pásmi, teoretický model

Sklené nosníky vystužené oceľovými profilmi predstavujú pri porovnaní so železobetónovými prvkami určitú analógiu. Rovnako ako v prípade železobetónových nosníkov ovplyvňujú pôsobenie vystužených sklených nosníkov rôzne stupne vystuženia (obr. 5.3).

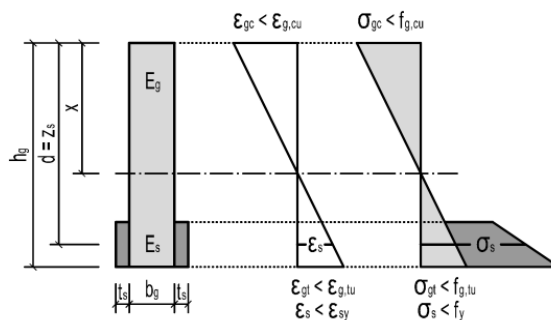


Obr. 5.3 – Graf závislosti namáhania a pretvorenia (krivosti) pre rôzne stupne vystuženia sklených nosníkov (Ølgaard, 2009)

Pri správnom stupni vystuženia dochádza pri vzniku trhlín k plastickému pretváraniu nosníka (vplyvom plastizácie materiálu výstuže). Ak je stupeň vystuženia príliš nízky, pri vzniku trhlín nastane výrazné tečenie alebo pretrhnutie výstuže. Vystužený sklený nosník sa správa podobne ako nosník bez vystuženia. Pri vysokom stupni vystuženia nedôjde pri vzniku trhliny ku plastizácii výstuže a porušenie má opäť náhly charakter. Definitívny kolaps nosníka nastane vo všetkých prípadoch buď vplyvom vyčerpania odolnosti prierezu v tlačenej oblasti, alebo vplyvom poškodenia výstuže (odlepenie, plastizácia, pretrhnutie) v ťahanej oblasti. Pri správnom stupni vystuženia však nie je kolaps nosníka náhly, ale predchádza mu výrazný nárast deformácií, postupný rozvoj a roztváranie trhlín. Pôsobenie vystuženého nosníka je možné teoreticky 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 a zavedením predpokladu, že rovinný prierez zostane aj po pretvorení rovinný, bude pozdĺžna deformácia jednotlivých vlákien priamo úmerná ich vzdialenosti od neutrálnej osi, obr. 5.4.



Obr. 5.4 – Nehomogénny prierez, priebeh pozdĺžnej pomernej deformácie  $\varepsilon$  a normálového napätia  $\sigma$  pri namáhaní ohybovým momentom, štádium I

Odolnosť vystuženého skleného nosníka je možné posudzovať podľa vzťahov platných pre štádium I do okamihu, kedy normálové napätie na ťahanom okraji sklenej časti nepresiahne hodnotu pevnosti skla v ťahu.

### Štádium II

Pri analýze vystuženého skleného nosníka v štádiu II sa vychádza z niekoľkých 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 ocele 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 tlačенú a ťahanú časť, obr. 5.5.



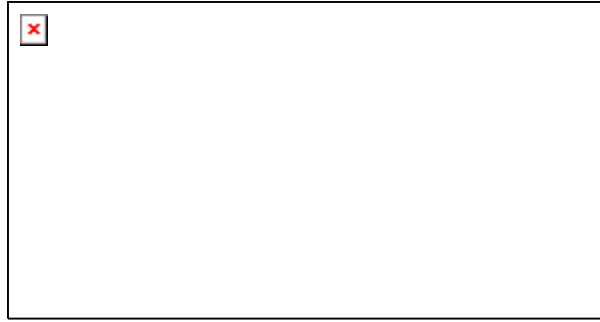
Obr. 5.5 – Vystužený prierez, priebeh pozdĺžnej pomernej deformácie  $\varepsilon$  a normálového napätia  $\sigma$  pri namáhaní ohybovým momentom, štádium II

### Štádium III

Pri analýze vystuženého skleného nosníka v štádiu III sa vychádza z rovnakých predpokladov ako v predchádzajúcom prípade (v štádiu II). Rozdielom je, že namáhanie ocele v oblasti ťahových napätí prekračuje pružnú oblasť pôsobenia materiálu (obr. 5.6). Medza klzu je dosiahnutá vo všetkých vláknoch ocele výstuže a využíva sa bilineárny pracovný diagram ocele s horizontálnou hornou vetvou. Rozdelenie tlakových napätí v sklenej časti má naďalej lineárny trojuholníkový priebeh.

Maximálna teoretická odolnosť vystuženého skleného prierezu namáhaného ohybovým momentom  $M_{ult}$  sa vypočíta podľa vzťahu (5.1).

$$M_{ult} = A_s f_y \left( d - \frac{2}{3} \frac{A_s f_y}{b_g f_{g,cu}} \right) \quad (5.1)$$

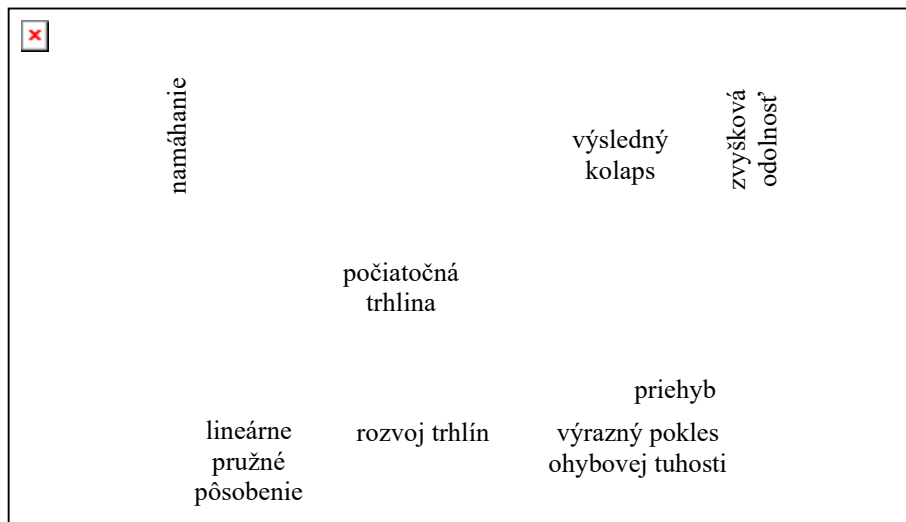


Obr. 5.6 – Vystužený prierez, priebeh pozdĺžnej pomernej deformácie  $\varepsilon$  a normálového napätia  $\sigma$  pri namáhaní ohybovým momentom, štádium III

Teoretická hodnota ohybovej odolnosti vystuženého skleneného nosníka  $M_{ult}$  v praxi nie je nikdy dosiahnutá. Z experimentov vyplýva, že finálny kolaps nosníka nenastane pretrhnutím výstuže alebo dosiahnutím pevnosti skla v tlaku, ale dôjde buď k oddeleniu (odlepeniu) oceľovej výstuže, alebo k zlyhaniu tlačenej sklenej časti vplyvom straty stability.

## 5.2 Mechanizmus porušovania

Pôsobenie vystuženého skleneného nosníka je možné podľa charakteru a rozsahu poruchy rozdeliť do niekoľkých skupín. Túto situáciu približne ilustruje obr. 5.7.



Obr. 5.7 – Schématické znázornenie závislosti medzi namáhaním a deformáciou pri ohybovej skúške vystuženého skleneného nosníka (Louter, 2007)

Mechanizmus porušovania vystuženého skleneného 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.).

## 5.3 Aspekty navrhovania vystužených sklenených nosníkov

### Typ skla

Rozhodujúcim faktorom pevnosti skla v ťahu je poškodenie jeho povrchu mikrotrhlinami. Na okrajoch sklenených tabúl je poškodenie povrchu vplyvom rezania, brúsenia a leštenia ešte výraznejšie. Mechanické vlastnosti skla je možné ovplyvniť kalením.

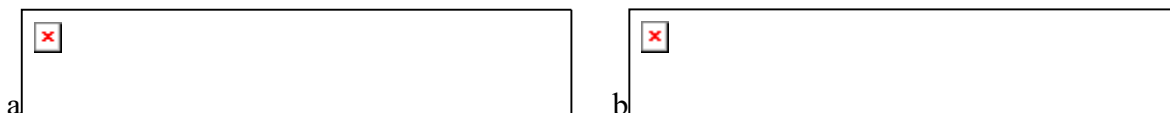
Všeobecne je použitie kaleného skla v nosných konštrukciách výhodné, neplatí to však v prípade vystužených sklenených nosníkov. Pri poškodení kaleného skla dochádza k okamžitému trieštivému rozpadu tabule na množstvo drobných častí a sklenená časť nie je schopná prenášať tlakové sily. Preto sa častejšie používa sklo nekalené. Porušuje sa pri nižšej hladine ťahového namáhania, ale pri poškodení vznikajú väčšie kompaktné časti, ktoré sú schopné prenášať tlakové sily.

### Tvar a usporiadanie výstuže

Sklený nosník môže byť vystužený oceľovými (kovovými) profilmi niekoľkými spôsobmi. Veľmi často sa používajú oceľové pásy alebo hranaté rúrkové profily malých rozmerov. Výstužný profil je pripojený na spodnej hrane, na povrchu, dokonca môže byť čiastočne integrovaný v sklenej časti (obr. 4.2 vľavo). Tvar a poloha výstuže významne vplývajú na náročnosť a pracnosť výroby, kvalitu pripojenia a výsledné pôsobenie vystuženého nosníka. Dôležitým faktorom je veľkosť plochy styku sklenej časti s výstužným profilom. Plocha styku významne ovplyvňuje namáhanie lepidla a celkovú životnosť zlepeného spoja.

### Typ lepidla

Materiál lepidla je zaujímavý nielen z pohľadu odolnosti voči mechanickému namáhaniu, ale tiež z hľadiska životnosti pri rôznych podmienkach okolitého prostredia, ktorému bude sklený nosník počas doby užívania vystavený. Na životnosť zlepeného spoja významne vplývajú tri faktory – teplota, vlhkosť a dĺžka trvania zaťaženia. Lepidlá je možné na základe materiálovej bázy rozdeliť na akrylátové, epoxidové, polyuretánové a silikónové. Okrem mechanických vlastností a životnosti sa vzájomne líšia časom vytvrdnutia, farbou a optimálnou hrúbkou vytvoreného spoja. S poslednou vlastnosťou súvisí aj schopnosť lepidla vyplňať medzery spôsobené nerovnosťami na zlepaných povrchoch.



Obr. 5.8 – Rozvoj a vetvenie trhlín (Louter, 2007):  
a) akrylátové lepidlo, b) epoxidové lepidlo

## 6 EXPERIMENTÁLNE OVEROVANIE SKLENÝCH NOSNÍKOV

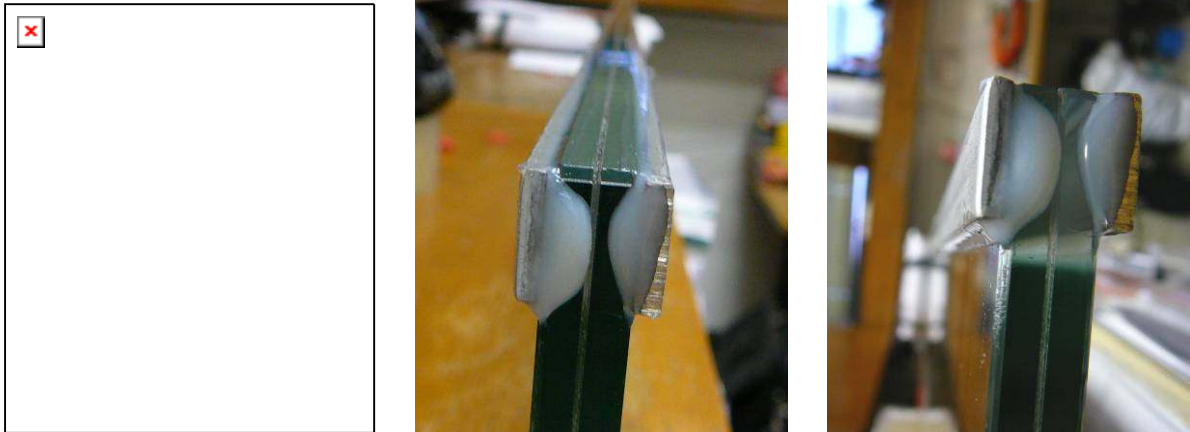
Experimentálny výskum zrealizovaný na Katedre kovových a drevených konštrukcií STU v Bratislave sa zameril na skúmanie vlastností moderných sklenených konštrukcií. Úlohou experimentálnych prác bolo overenie pôsobenia 4 základných typov sklenených nosníkov. Boli skúmané nevystužené nosníky z vrstveného nekaleného a plne kaleného skla a tiež rovnaké vystužené nosníky. Výsledky experimentov boli porovnané s teoretickými výsledkami výpočtových modelov.

### 6.1 Skúmané typy nosníkov, materiál a geometria

Prvá časť experimentálneho výskumu bola zameraná na doplnenie a overenie 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 sklenených nosníkov. Výsledky experimentu taktiež slúžili ako podklady pre návrh a realizáciu ďalších experimentálnych prác týkajúcich sa skúmania

efektívnosti moderných konštrukčných sústav vytvorených na báze spolupôsobenia skla s kovovými materiálmi.

V rámci druhej časti experimentálneho výskumu bolo skúmané správanie sklenených nosníkov vystužených nerezovou pásovinou. Výstužný profil (pásovina, páska) bol pripojený na spodný okraj na oboch povrchoch sklenej časti lepidlom. Výsledky experimentu boli vyhodnotené z pohľadu skúmania charakteru porušovania pre rôzne hladiny namáhania a rôzne štádiá pôsobenia vystuženého skleneného nosníka.



Obr. 6.1 – Nalepená výstužná pásovina (detail), schéma a skutočné prevedenie

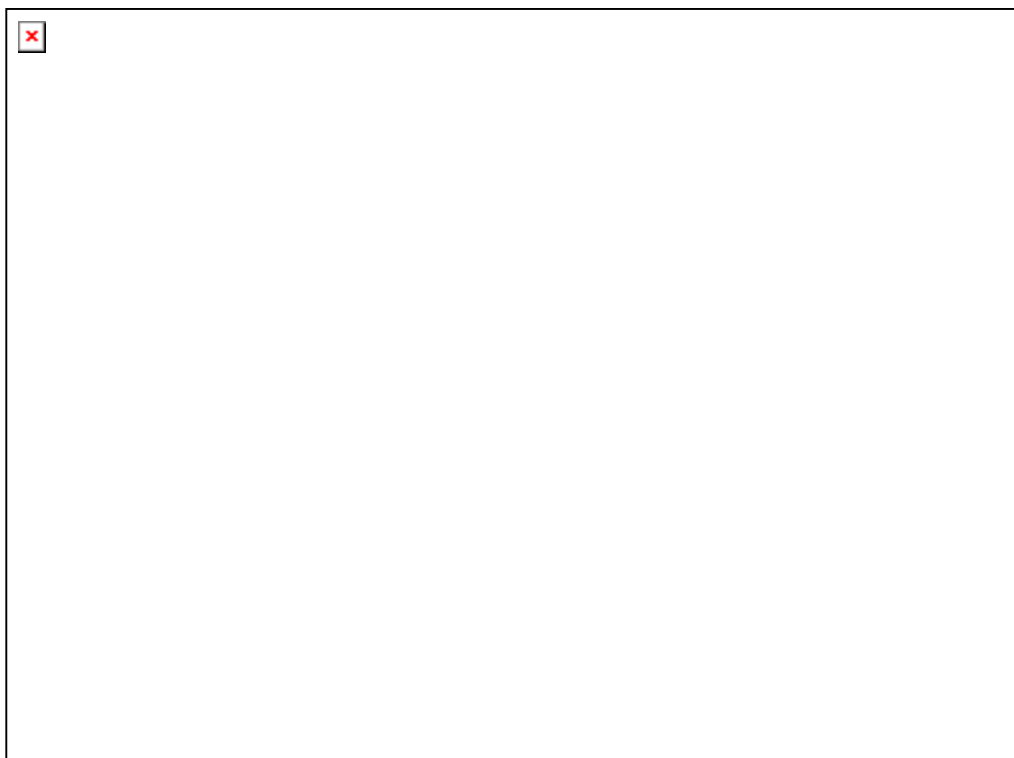
Skúšobné vzorky sklenených nosníkov mali rozmery 1500 x 130mm a na ich výrobu boli použité tabule vrstveného skla (nekaleného alebo plne kaleného) s hrúbkou 5mm, ktoré boli vzájomne spojené PVB fóliou s hrúbkou 0,76mm. Teoretická hrúbka vrstvenej sklenej tabule bola teda 10,76mm. Ako výstužný profil sa použil nerezový pásový materiál kvality EN 1.4301, resp. STN 17 240. Austenitická chróm – niklová oceľ je najpoužívanejším druhom nerezového materiálu. Vyznačuje sa veľmi dobrou odolnosťou voči korózii, tvárnosťou za studena a zvarateľnosťou. Je odolná voči vode, vodnej pare, vlhkosti vzduchu, jedlým kyselinám, slabým organickým a anorganickým kyselinám. Strihaná pásovina s prierezom 15 x 3mm bola nalepená na obidva povrchy sklenej tabule pozdĺž celého nosníka na jednom jeho okraji (pri zaťažení na ťahanom okraji). Detail nosníka s nalepenou výstužnou páskou ilustruje obr. 6.1.

Na základe výsledkov prípravných meraní sa na lepenie výstužnej pásky použilo dvojzložkové epoxidové lepidlo na všeobecné použitie Loctite Hysol 9466. Veľkou výhodou lepidla bola jeho predĺžená doba spracovateľnosti, čo zvyšovalo komfort práce pri zostavovaní lepených častí a čistení použitých pracovných nástrojov (výrobca udáva dobu spracovateľnosti po zmiešaní zložiek až 60 minút).

## 6.2 Príprava experimentu

### Zaťažovacia zostava

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 sklenených nosníkov, bola navrhnutá a vyrobená skúšobná zaťažovacia zostava, ktorá bola osadená v stacionárnom hydraulickom lise ZDMU 30 s maximálnou zaťažovacou silou 100kN (obr. 6.2).



Obr. 6.2 – Zaťažovacia zostava, schéma a osadenie v hydraulickom lise

### Meracie zariadenia

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 sklenených nosníkov boli merané (sledované) nasledujúce 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 |

## 7 VYHODNOTENIE MERANÍ A PREHĽAD DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

Celkovo bolo v laboratóriu KKDK na STU v Bratislave odskúšaných 16 vzoriek sklenených 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. Označenie vzoriek označovalo druh skla a poradové číslo vzorky daného typu podľa poradia pri skúšaní. Počet a označenie jednotlivých vzoriek v skupinách boli nasledujúce:

- |  |    |                 |
|--|----|-----------------|
| – nevystužené nosníky z plaveného skla     | 3x | ANG-1 až ANG-3  |
| – nevystužené nosníky z plne kaleného skla | 4x | FTG-1 až FTG -4 |

- vystužené nosníky z plaveného skla 7x ANG-1R až ANG-7R
- vystužené nosníky z plne kaleného skla 2x FTG-1R až FTG-2R

## 7.1 Experimentálne merania na overenie mechanických vlastností materiálu

Základné mechanické vlastnosti skla ako konštrukčného materiálu sa overovali na skúšobných vzorkách nevystužených nosníkov, ktoré boli vyrobené z vrstveného plaveného alebo plne kaleného skla. Experimentálne merania potvrdili krehký charakter porušovania sklenených prvkov a tiež 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. Vyhodnotením skúšok sa takisto potvrdilo neobmedzené ideálne pružné pôsobenie skla ako materiálu. Namerané hodnoty Youngovho modulu pružnosti zodpovedali všeobecne uvádzanému údaju pre sodno – vápenaté kremičité sklo  $E_g = 70\text{GPa}$ . Skúšky na nosníkoch z kaleného skla upozornili na stabilitné problémy spojené s klopením.

Nebezpečný krehký charakter porušovania sa pri oboch typoch nosníkov prejavil totálnym kolapsom vzorky, ktorému nepredchádzal žiadny pozorovateľný rozvoj trhlin 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. 7.1 – Typický charakter porušenia vzoriek ANG (vľavo) a vzoriek FTG (vpravo)

Výsledky experimentálnych meraní boli porovnané s jednoduchými teoretickými výpočtami a tiež s podrobnými výpočtami MKP. Obidve skupiny výsledkov preukázali veľmi dobrú zhodu s hodnotami získanými pri experimente. Pri výpočte MKP sa potvrdil pozitívny vplyv stabilizácie tlačeneho okraja nosníka a vypočítané hodnoty kritických zaťažení korešpondovali s experimentálnym meraním na nosníkoch z plne kaleného skla. Vplyv priečného vybočenia nosníka pri strate stability bol overovaný geometricky nelineárnym výpočtom MKP, ktorý preukázal takisto dobrú zhodu s experimentálnym meraním.

## 7.2 Experimentálne overovanie spolupôsobenia skla s kovovými materiálmi

V rámci druhej časti experimentálneho výskumu bolo skúmané správanie sklenených nosníkov vystužených nerezovou pásovinou.

## 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. Porovnaním s výsledkami skúšok na nevystužených nosníkoch z plaveného skla možno jednoznačne konštatovať, že vystužené nosníky dosahujú 2,5 až 4 – násobne vyššie hodnoty výslednej odolnosti pri totálnom porušení nosníka. Z pohľadu celkovej odolnosti sa pôvodný krehký charakter porušenia sklenených 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.



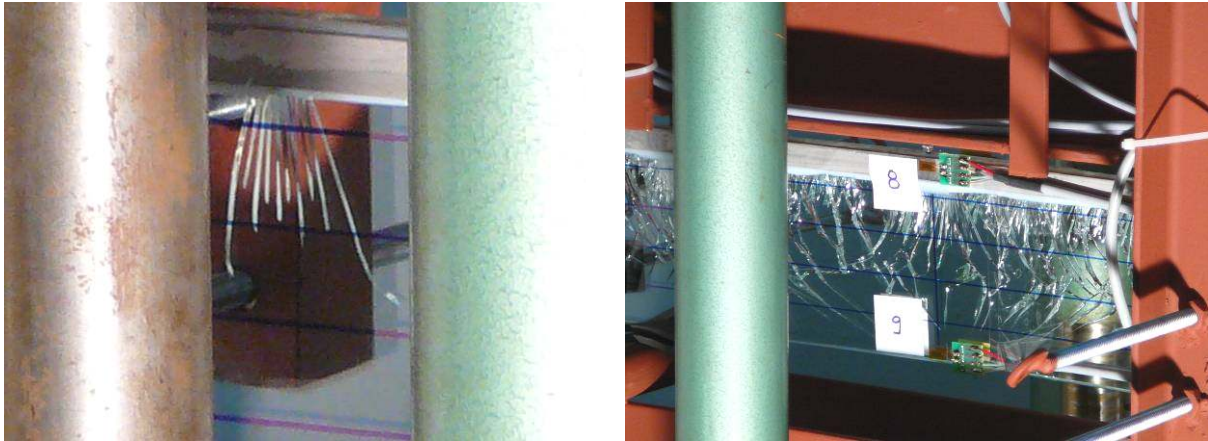
Obr. 7.2 – Grafy závislosti  $P - w$  nosníkov ANG-R

Z pohľadu hodnotenia zvýšenia odolnosti nosníka pred vznikom trhliny je možné konštatovať, že vystužené nosníky dosahovali 1,7 až 3,3 – násobnú odolnosť oproti nevystuženým nosníkom z plaveného skla, ale iba 50 až 100% odolnosť v porovnaní s nevystuženými nosníkmi z plne kaleného skla. Z pohľadu zabezpečenia zvyškovej odolnosti bola dosiahnutá 100% úspešnosť, pretože všetky vystužené nosníky z plaveného skla boli po vzniku trhliny ďalej schopné prenášať (dokonca) narastajúce zaťaženie a ani v jednom prípade nedošlo ku kolapsu nosníka po vzniku prvej trhliny. Meranie pomerných deformácií počas zaťažovania skúšobných vzoriek preukázalo, že pri vzniku ťahovej trhliny nastane v posudzovanom priereze okamžité prerozdelenie namáhania medzi neporušenú sklenú časť a výstužnú pásku, pričom výraznejší nárast namáhania bol zaznamenaný na ťahanom okraji prierezu (výstuž). Takisto sa potvrdila hypotéza, že ťahová trhlina prebieha pri nosníku z plaveného skla oboma vrstvami skla približne v rovnakom reze, pretože náhla zmena pomernej deformácie výstužnej pásky sa na oboch povrchoch skla prejavila takmer v úplne rovnakom čase.

Z hľadiska použitých okrajových podmienok boli vykonané skúšky vystužených nosníkov bez doplnenej stabilizácie tlačeneho okraja a s doplnenou stabilizáciou tlačeneho okraja nosníka. Experimenty preukázali, že stabilizácia tlačeneho okraja nosníka významne ovplyvňuje rozvoj trhlín, ale predovšetkým výsledný charakter totálneho kolapsu vystuženého nosníka. Obe skupiny nosníkov sa pred vznikom trhliny správali rovnako. Pri kontrole skúšobných vzoriek v štádiu bez trhlín nebolo spozorované ani v jednom prípade, že by dochádzalo k stabilitným problémom nosníka alebo k odlepovaniu výstužnej pásky.

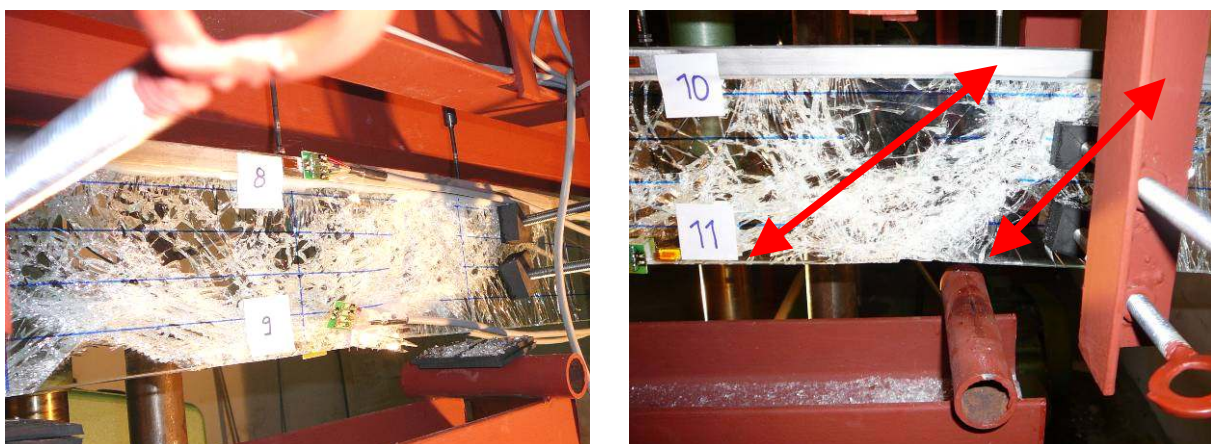


Počiatkové porušenie nosníka nastalo vznikom trhliny na ťahanom okraji. Trhliny mali mierne rozvetvený tvar a boli orientované kolmo na okraj nosníka. Vznikali v oboch vrstvách skla takmer súčasne, vo väčšine prípadov v oblasti maximálneho ohybového momentu. Dĺžka trhlín bola spočiatku obmedzená maximálne 3/5 celkovej výšky prierezu nosníka. Nosník bol schopný ďalej prenášať narastajúce zaťaženie a dochádzalo k vzniku alebo vetveniu nových trhlín.



Obr. 7.3 – Počiatkové trhliny na ťahanom okraji 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. Pri nosníkoch bez doplnenej stabilizácie dochádzalo k rozvoju trhlín výrazne šikmým smerom, trhliny sa vzájomne prepojili, postupne rozšírili k tlačnému okraju a nastalo vybočenie tlačného okraja nosníka do strany. Nasledoval finálny kolaps, tlačná oblasť nosníka „explodovala“ a drobné úlomky s rozmermi niekoľko milimetrov boli vymrštené do značnej vzdialenosti. Výrazne poškodený nosník nebol schopný prenášať žiadne zaťaženie. Pri nosníkoch s doplnenou stabilizáciou sa trhliny k tlačnému okraju šírili nepravidelne. Finálny kolaps nosníka nastal následkom vybočenia tlačného okraja medzi doplnenými bočnými podperami alebo došlo k sformovaniu výraznej šikmej trhliny v mieste podpory zaťažovacieho priečnika. Šikmá trhlina so sklonom približne  $45^\circ$  až  $60^\circ$  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. 7.4 – Totálny kolaps nosníka spôsobený stratou stability tlačného 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.

### **Skúšky vystužených nosníkov z plne kaleného skla**

Použitie vystuženia v kombinácii s plne kaleným sklom nezabezpečilo výraznú zmenu v charaktere porušovania vystužených vzoriek a takisto sa nedosiahol ani efekt zvyškovej odolnosti nosníka pri porušení sklenej časti trhlinou. Pred vznikom trhliny sa vystužené nosníky správali rovnako ako nosníky z plaveného skla. Porušenie vzoriek nastalo krehkým lomom. Pri vzniku trhliny sa vrstvy skla okamžite rozpadli na množstvo drobných častí a k redistribúcii namáhania medzi tlačenu 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. Zvýšenie odolnosti vystužených nosníkov je vzhľadom na rovnaké nevystužené nosníky zanedbateľné (menej ako 10%) a vzhľadom na vystužené nosníky z plaveného skla je výsledná odolnosť približne vyššia o 30%. Vyššia odolnosť vystužených nosníkov z plne kaleného skla však nie je dôsledok vystuženia ťahaného okraja nosníka, ale vplyv kalenia. Na základe uvedených výsledkov je možné konštatovať, že vystužovanie nosníkov z plne kaleného skla nemá praktický význam.

### **Z výsledkov experimentálneho výskumu na odskúšaných typoch sklenených nosníkov je možné formulovať nasledujúce závery:**

- potvrdil sa krehký charakter porušovania sklenených 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 tlačenej okraja;
- spolupôsobenie skla s výstužným profilom prostredníctvom epoxidového lepidla sa preukázalo ako dostatočné;
- estetické prevedenie zlepeného 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 odolnosť 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 sklenených nosníkov sa zmenil na pretvárný (plastický), čo sa prejavuje poklesom ohybovej tuhosti nosníka;
- pokles ohybovej tuhosti je spôsobený zväčšovaním rozsahu poškodenia sklenej časti trhlínami, 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).

### 7.3 Návrh zlepšení a úprav overovaných sústav

Pri experimentálnom overovaní vystužených nosníkov sa objavili predovšetkým problémy so stabilitou skúšobných vzoriek. Napriek doplnenej stabilizácii tlačenej okraja dochádzalo pri kolapse vzoriek k vybočeniu poškodenej tlačenej časti. Z tohto pohľadu by bolo zaujímavé overiť výsledný charakter porušovania vzoriek pri kontinuálnom podpretí tlačenej okraja nosníka alebo upraviť geometriu prierezu vzoriek tak, aby sa strata stability pred vyčerpaním pevnosti materiálov obmedzila, resp. neprejavila (T prierez, I prierez, uzavretý prierez).

Uskutočnené merania je možné pokladať za krátkodobé skúšky. Napriek tomu, že pri experimente nebolo spozorované dotvarovanie lepidla, preklz výstužnej pásky alebo iné poruchy zlepového spoja, bolo by vhodné vykonať aj dlhodobé merania. Dlhodobé merania na nepoškodených a poškodených nosníkoch by poskytli užitočný obraz o možnostiach a limitoch použitia vystužených nosníkov v praxi.

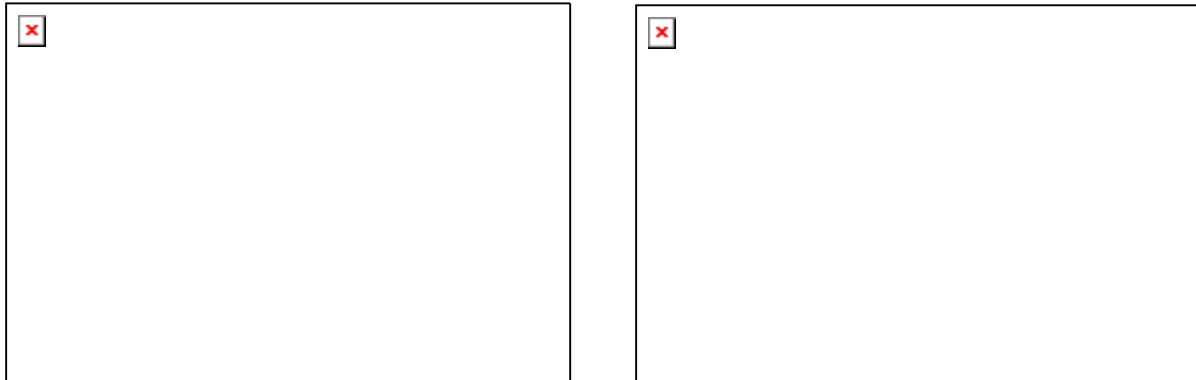
Porovnaním experimentálne určených hodnôt s výsledkami výpočtov sa preukázalo, že použitie zjednodušeného bilineárneho diagramu alebo normového pracovného diagramu nerezovej ocele je vzhľadom na interpretáciu výsledkov nedostatočné. V ďalšej experimentálnej práci by bolo preto potrebné venovať lepšiu pozornosť získaniu skutočných materiálových charakteristík použitej výstuže.

V dvoch prípadoch vystužených nosníkov s doplnenou stabilizáciou tlačenej okraja sa výsledný kolaps skúšobnej vzorky prejavil vznikom šikmej trhliny. O výslednej odolnosti nosníka pravdepodobne rozhodlo namáhanie pričnou silou, resp. kombináciou namáhania pričnou silou a ohybovým momentom. Pri vyhodnocovaní teoretických modelov, by bolo preto vhodné zamerať pozornosť nielen na hodnoty normálových napätí v smere nosníka  $\sigma_x$ , ale tiež sledovať veľkosť a trajektórie hlavných napätí v sklenej časti v oblasti koncentrácie namáhania.

## 7.4 Aplikácia teoretických modelov a porovnanie výsledkov

Výsledky experimentálnych meraní boli porovnané s teoretickými modelmi. Overovali sa jednoduché modely využívajúce princípy technickej pružnosti a lineárnej stavebnej mechaniky (metóda ideálneho zloženého prierezu) a taktiež bolo zostavených niekoľko modelov pre podrobný výpočet MKP. Pri výpočtoch MKP sa použil výpočtový softvér firmy Ing. Software Dlubal – RFEM 4. Jednoduché parametrické výpočty boli spracované v programe MathCad 13.0 alebo v programe MS Office Excel 2003. V oboch prípadoch sa analyzovalo pôsobenie nosníka v neporušenom štádiu a tiež pôsobenie nosníka poškodeného trhlinami.

Model ideálneho zloženého prierezu je obmedzený lineárnym pôsobením materiálu výstuže, a preto reálne vystihuje správanie nosníka pri nižšej úrovni zaťaženia, čomu zodpovedá pôsobenie nosníka bez trhlín (štádium I). Pri vzniku trhliny sú výsledky porovnateľné iba vtedy, ak vo výstuži nedôjde ku prekročeniu medze klzu (štádium II). Použitá nerezová oceľ EN 1.4301 nemá výraznú medzu klzu (iba dohodnutú) a táto skutočnosť výrazne ovplyvnila jednak namerané výsledky, a jednak výsledky výpočtov. Napriek tomu vypočítané hodnoty potvrdili, že v mieste trhliny dochádza k značnému nárastu normálových napätí vo výstuži, ale nárast normálových napätí na okraji sklenej časti je len minimálny. Výsledná odolnosť vystuženého nosníka pri totálnej plastizácii výstuže v trhline (štádium III, vodorovná vetva bilineárneho pracovného diagramu) je vzhľadom na hodnoty dosiahnuté pri experimentálnom meraní príliš konzervatívna (asi 55% z reálnej odolnosti), pretože zanedbáva pomerne výraznú oblasť spevnenia materiálu výstuže, ktorá má stúpajúcu tendenciu až do porušenia. Použitím analýzy vystuženého skleneného nosníka metódou ideálneho zloženého prierezu boli formulované základné požiadavky súvisiace s optimalizáciou plochy navrhovanej výstuže (obr. 7.5).



Obr. 7.5 – Minimálna (vľavo) a maximálna (vpravo) hrúbka výstuženej pásky vzhľadom na medzu klzu materiálu výstuže

Výpočtové úlohy MKP sa venovali problematike modelovania vystužených sklených nosníkov jednak z hľadiska rozsahu poškodenia sklenej časti (bez trhliny, jedna trhlina, viacero trhlín a kontinuálne poškodenie nosníka), a jednak z hľadiska materiálového modelu výstuže (lineárna a nelineárna závislosť  $\sigma - \varepsilon$ ). Pri nevystužených nosníkoch sa overoval tiež vplyv stabilizácie tlačenej okraja a pôsobenie nosníka pri poškodení jednej vrstvy skla ťahovou trhlinou. Vykonané teoretické výpočty umožnili pochopenie problematiky pôsobenia vystužených sklených nosníkov komplexnejšie a poukázali na súvislosti, ktoré by pri jednoduchej analýze a interpretácii meraných údajov zostali pravdepodobne skryté. Výpočty MKP preukázali, že výrazný pokles ohybovej tuhosti vystužených nosníkov nie je možné dosiahnuť výlučne poškodením sklenej časti ťahovou trhlinou pri pružnom pôsobení výstuže (v akomkoľvek rozsahu – jedna trhlina až kontinuálne poškodenie nosníka). Ak je po vzniku

trhliny výstuž nad'alej v pružnom stave, je nárast zvislého priehybu len minimálny. Pri experimente teda reálne muselo dochádzať k plastizácii výstužnej pásky, pretože inak by pretvárný charakter porušovania s takmer horizontálnou vetvou nebol možný. Pri plastickom pôsobení výstuže sa naopak vplyv rozsahu poškodenia sklenej časti trhlinami prejavil veľmi výrazne. Ak po vzniku trhliny dôjde k zvýšeniu normálového napätia nad medzu klzu (iba teoretická hodnota), výstuž začína plastizovať a priehyb výrazne narastá. V trhline so splastizovanou výstužou má vystužený nosník veľmi malú ohybovú tuhosť a teoreticky sa výsledná ohybová tuhosť celého nosníka blíži ohybovej tuhosti prierezu so splastizovanou výstužou. Pri podrobnej analýze okolia trhliny sa pri modeloch MKP telesovými prvkami objavila nesymetrická napätosť na povrchoch výstužného profilu a nerovnomerné rozloženie normálových napätí po hrúbke sklenej časti na okraji trhliny. V reálnej situácii môžu oba faktory významne vplývať na plastizáciu výstuže v trhline.



Obr. 7.6 – Graf závislosti  $P - U_z$  nosníkov ANG-R, porovnanie výsledkov MKP, všetky modely

Odchýlky medzi teoretickými hodnotami z výpočtu MKP a nameranými údajmi sú v najväčšej miere spôsobené faktom, že skutočný pracovný diagram použitej nerezovej ocele nebolo možné pri príprave experimentu overiť a pri výpočtoch bol použitý buď zjednodušený bilineárny pracovný diagram (výpočty metódou ideálneho zloženého prierezu), alebo normový pracovný diagram podľa EN 1993-1-4: 2006 (E). Obecne možno povedať, že všetky výpočtové modely a použité výpočtové metódy sú použiteľné pri návrhu vystužených sklených nosníkov a dosiahnuté výsledky predstavujú hodnoty na strane bezpečnej.

## 8 FORMULÁCIA ZÁVEROV PRE TEORETICKÝ PRÍNOS A VYUŽITIE V PRAXI

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 skleneného 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 pretvárný. Pred totálnym porušením vystuženého prvku sa dá

pozorovať viditeľné poškodenie sklenej časti a výrazný nárast deformácií. Použitie plne kaleného skla sa pri vystužených nosníkoch neosvedčilo, pretože pri počiatocnom vzniku trhliny dochádza k trieštivému rozpadu skla na drobné časti a zlyhanie nosníka je náhle, resp. rovnaké ako pri nevystuženom nosníku.

Pri návrhu vystužených sklenených nosníkov je potrebné venovať dostatočnú pozornosť typu a geometrii výstužného prvku, primeranému stupňu vystuženia a tiež voľbe vhodného lepidla. Na výslednú odolnosť a charakter porušovania vystužených nosníkov významne vplyvajú okrajové podmienky, ktorými je zabezpečená celková stabilita ohýbaného prvku. Vzhľadom na geometriu prierezu ide o veľmi štíhle prvky, ktoré sú veľmi citlivé na stratu stability (klopenie). Je teda žiadúce, aby bolo zabezpečené bočné podopretie tlačeneho okraja nosníka v čo najväčšom možnom rozsahu, najlepšie kontinuálne. Preto by sa mohli vystužené sklenené nosníky veľmi dobre uplatniť pri riešení celotransparentných strešných a stropných konštrukcií, kde by vo funkcii „rebier“ spolu s plošnými prvkami zasklenia tvorili súčasť horizontálneho nosného systému. V prípade fasádnych konštrukcií by bolo potrebné použiť vystuženie na oboch okrajoch sklenej časti, pretože zaťaženie vetrom má premenlivý účinok.

Pri posudzovaní odolnosti sklenených prvkov v praxi sa navyše núka otázka, či je vôbec žiaduce, aby bol prvok ponechaný v nosnej konštrukcii aj po vzniku trhliny. Trhlina je pozorovateľná voľným okom, narušuje estetický vzhľad, psychickú pohodu užívateľov, a teda aj používateľnosť konštrukcie. Pre posúdenie odolnosti vystuženého nosníka na medzi vzniku trhliny je postačujúca jednoduchá analýza metódou zloženého ideálneho prierezu a dodržanie podmienky minimálneho stupňa vystuženia. Dôležitým parametrom pre určenie odolnosti vystuženého nosníka na medzi vzniku trhliny je hodnota návrhovej pevnosti skla v ťahu. V súčasnom stave problematiky navrhovania sklenených konštrukcií sa však relevantné normy pre posudzovanie (predovšetkým prEN 13474 Glass in building – Design of glass panes) zaoberajú plošnými prvkami a uvedené pevnosti skla sú výsledkom štúdií na vzorkách zaťažených kolmo k strednicovej rovine (doskové pôsobenie), kde vplyv okrajov na pevnosť skla (v ťahu) nie je výrazný. Aby bolo vôbec možné v budúcnosti zodpovedne navrhovať aj iné ako doskové prvky, je nevyhnutný ďalší výskum v oblasti pevnosti skla. V prípade, že je potrebné určiť totálnu odolnosť vystuženého nosníka poškodeného trhlinami, je vhodnejšie použiť podrobnú teoretickú analýzu (napr. MKP), ktorá umožňuje skúmať porušený nosník komplexne.

## ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- Abiassi, J. J. (1981) The Strength of Weathered Window Glass Using Surface Characteristics, Institute for Disaster Research, Texas Tech University, 1981
- Basu, B., Tiwari, D., Kundu, D., Prasad, R. (2009) Is Weibull distribution the most appropriate statistical strength distribution for brittle materials?, *Ceramics International* 35, pp. 237-246, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 2009
- Beason, W. L., Morgan, J. R. (1984) Glass Failure Prediction Model, *Journal of Structural Engineering* Vol. 110, No. 2, 1984, pp. 197-212
- Bilčík, J., Fillo, L., Benko, V., Halvonik, J. (2008) *Betónové konštrukcie – Navrhovanie podľa STN EN 1992-1-1*, Vydavateľstvo STU, ISBN 978-80-227-2940-6, Bratislava 2008
- Blank, K. (2000) *Bemessung von Flachglas auf bruchmechanischer Grundlage*, VDI – Gesellschaft Bautechnik, Bauen mit Glas, Tagung Baden-Baden, VDI Berichte 1527, pp. 525-545, Germany, 2000
- Bos, F. P., Veer, F. A., Hobbelman, G. J., Louter, P. C. (2004) *Stainless Steel Reinforced And Post – Tensioned Glass Beams*, 12th International Conference on Experimental Mechanics, Italy, 2004
- Bove, P. M. (1995) *Failure Prediction for Heat Treated Window Glass*, A Dissertation in Civil Engineering, Texas Tech University, 1995
- Brodniansky, J., Ároch, R. (2000) *Teoretické a experimentálne overenie strešných sklenených tabúl z lepeného skla (ZoD č. 04 – 122 – 00)*, Stavebná Fakulta STU Bratislava, Bratislava 2000
- Brodniansky, J. (2001) *Konštrukcie z ocele a skla, príspevok v rámci projektu Vega č. 1/7139/20*, Bratislava 2001
- Brown, W. G. (1974) *A Practicable Formulation for the Strength of Glass and its Special Application to Large Plates*, National Research Council of Canada, Publication No. NRC 14372, Ottawa 1974, pp. 31
- Colvin, J. (2003) *Look – No Frames!*, Glass Processing Days 2003
- Crompton, P. R. (1999), *Assessment of design procedures for structural glass beams*, A thesis submitted by for the degree of Master of Science at the University Oxford, 1999
- Cruz, P., Pequeno, J. (2008) *Timber – Glass Composite Structural Panels: Experimental Studies & Architectural Applications*, Challenging Glass, Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, 2008
- DIN EN 10 088-3: 1995 *Stainless steels. Technical delivery conditions for general purpose semi-finished products, bars, rod and sections*, English version, 1995
- DIN EN 13 474-1 *Glass in building – Design of glass panes – Part1: General basis of design*; German version prEN 13 474-1: 1999
- DIN EN 13 474-2 *Glass in building – Design of glass panes – Part 2: Design for uniformly distributed loads*; German version prEN 13 474-2: 2000
- Eekhout, M. (2003) *Research in the structural use of glass*, The Cost 13 Conference on Dual Glass Facades, Graz 2003

- EN 1993-1-4: 2006 (E) Navrhovanie ocelových konštrukcií, Časť 1-2: Všeobecné pravidlá. Doplňkové pravidlá pre nehrdzavejúce ocele, English version, 2006
- Evans, A. G., Wiederhorn, S. M. (1974) Proof testing of ceramic materials – an analytical basis for failure prediction, *International Journal of Fracture*, 10 (3): 379-392, 1974
- Feldmann, M., Langosch, K. (2010) Knickfestigkeit und einheitliche Knickkurven für scheibenförmige Glasstützen mit Monoglasquerschnitt aus TVG und ESG, *Stahlbau Spezial 2010 – Konstruktiver Glasbau*, 2010
- Flinterhoff, A. (2003) Load carrying behaviour of hybrid steel – glass beams in bending, Master Thesis, University of Dortmund, Institute of Steel Construction, 2003
- Freytag, B. (2004) Glass – Concrete Composite Technology, *Structural Engineering International 2/2004*, pp. 111-117
- Griffith, A. A. (1920) The Phenomenon of Rupture and Flow in Solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. CCXXIA587, 1920, pp. 163-179
- Grotepaß, B. (2006) Application of hybrid steel – glass beams in modern architecture, Master Thesis, University of Dortmund, Institute of Steel Construction, 2006
- Haldimann, M. (2005) Flexible, Consistent and Safe Design of Structural Glass Elements, *Glass Processing Days 2005*
- Haldimann, M. (2006) Fracture strength of structural glass elements – analytical and numerical modelling, testing and design, Thesis No. 3671, EPFL, Lausanne, 2006
- Haldimann, M., Crisinel, M. (2007) Improving testing procedures to obtain more reliable strength data for structural glass design, *Glass Performance Days 2007*
- Haldimann, M., Luible, A., Overend, M. (2008) Structural Use of Glass, *International Association for Bridge and Structural Engineering*, Zürich 2008
- Hamm, J. (2000) Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas, PhD. Thesis Nr. 2065, IBOIS/EPFL, 2000
- Irwin, G. (1957) Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate, *Journal of Applied Mechanics*, 24: 361-364, 1957
- Jílek, A., Šmerda, Z., Grenčík, L., Novák, V. (1965) *Betonové konstrukce – I. díl*, Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1965
- Kallioniemi, J. (1999) Joints and fastening in steel – glass facades (Master's Thesis), Helsinki University of Technology, Helsinki 1999
- Karmazínová, M., Melcher, J. (2005) Experimentální ověření Mechanismu Porušování a Objektívni Mezní Únosnosti Dílců z Konstručního Skla, *Centre for Integrated Design of Advanced Structures*, 2005
- Kasper, R., Sedlacek, G. (2003) Structural Use of Glass Beams, *Glass Processing Days 2003*
- Kott, A., Vogel, T. (2006) Versuche zum Trag und Resttragverhalten von Verbund-sicherheitsglas, *Institut für Baustatik und Konstruktion Eidgenössische Technische Hochschule Zürich*, 2006
- Kreher, K. (2004) Tragverhalten und Bemessung von Holz – Glass Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas, PhD. Thesis Nr. 2999, IBOIS/EPFL, 2004
- Louter, C., Belis, J., Bos, F., Veer, F. A., Hobbelman, G. (2005) Reinforced Glass Cantilever Beams, *Glass Processing Days 2005*



- Louter, C. (2007a) Adhesively bonded reinforced glass beams, *HERON* Vol. 52, No. 1/2, 2007
- Louter, C., Veer, F. A. (2007b) Experimental research on scale 1:4 models of an 18m reinforced glass beam, part I, *Glass Processing Days 2007*
- Louter, C., Veer, F. A., Hobbelman, G. (2007c) Reinforcing glass, effects of reinforcement geometry and bonding technology, *Glass Performance Days 2007*
- Louter, C., Callewaert, D., Belis, J., Veer, F. A., Bos, F. (2008a) Reinforced glass beams; Effect of increased temperatures on the glass – to – reinforcement adhesive bond, *Structures 2008: Crossing Borders*, ASCE, 2008
- Louter, C., Veer, F. A., Belis, J. (2008b) Redundancy of reinforced glass beams; temperature, moisture and time dependent behaviour of the adhesive bond, *Challenging Glass, Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, 2008
- Melcher, J. (2001) Problems with design and experimental evaluation of glass facades construction, *Sustainable Building & Solar Energy*, 2001
- Melcher, J., Karmazínová, M. (2008) Mechanismus Porušování a Přetváření Strukturálního Tmelu v Nosných Spojích Dílců z Konstručního Skla, *Centre for Integrated Design of Advanced Structures*, 2008
- Ølgaard, A. B., Nielsen, J. H., Olesen, J. F., Stang, H. (2008) Properties of an Adhesive for Structural Glass Applications, *Challenging Glass, Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, 2008
- Ølgaard, A. B., Nielsen, J. H., Olesen, J. F. (2009) Design of Mechanically Reinforced Glass Beams: Modelling and Experiments, *Structural Engineering International* 2/2009
- Porter, M. (2001a) Aspects of Structural Design with Glass, A thesis submitted by for the degree of Doctor of Philosophy, Balliol College and the Department of Engineering Science, The University of Oxford, 2001
- Schittich, Ch., Staib, G., Balkow, D., Schuller, M., Sobek, W. (1999) *Glass Construction Manual*, Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel 1999
- Sedlacek, G., Blank, K., Gusgen, J. (1995) Glass in Structural in Engineering, *The Structural Engineer*, Vol. 73, No. 2, 1995
- Sedlacek, G., Blank, K., Laufs, W., GÜsgen, J. (1999) *Glas im Konstruktiven Ingenieurbau*, Ernst & Sohn, Berlin 1999
- Sedlacek, G. (2003) Liaison of CEN/TC 250 and CEN/TC 129, Basis of structural design for glass in buildings, Document: CEN/TC 250, N1491, 2003
- Sedlacek, G. (2005a) Application of the Eurocode family for the design of glass in building, Technical proposal for the contents of a new Eurocode on Design of glass structures, Document: CEN/TC 250, N657, 2005
- Sedlacek, G. (2005b) Proposal for the Content of New Eurocode on Design of Glass Structures, Part 1: Basis of Design – Design of Glass Panes, Document: CEN/TC 250, N658, 2005
- Shand, E. B. (1965) The Strength of Glass – The Griffith Method Revised, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 48, No. 1, 1965, pp. 43-49
- Siebert, G. (2007) Design of glass structures based on fracture mechanics and its integration in national and European design codes, *Glass Performance Days 2007*

- Sobek, W., Kutterer, M., Messmer, R. (1998) Rheologisches Verhalten von PVB im Schubverbund, Forschungsbericht, Universität Stuttgart 1998
- Hysol 3430 (2008) Technický list Hysol 3430™, Henkel 2008
- Hysol 9466 (2006) Technický list Hysol 9466™, Henkel 2006
- Užívateľská a riešiteľská príručka Loctite (2008), Henkel Slovensko s.r.o., Adhesives Special Loctite, 2008
- Veer, F. A., Riemslog, A. C., Ting, C. N. (2001) Structurally Efficient Glass Laminated Composite Beams, Glass Processing Days 2001
- Veer, F. A., Rijgersberg, H., Ruytenbeek, D., Louter, P. C., Zuidema, J. (2003) Composite Glass Beams, the Third Chapter, Glass Processing Days 2003
- Veer, F. A. (2005) 10 Years of ZAPPI Research, Glass Processing Days 2005
- Veer, F.A. (2007) The strength of glass, a nontransparent value, HERON Vol. 52, No. 1/2, 2007
- Vuolio, A. (2003), Structural Behaviour of Glass Structures in Facades, Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 27, Espoo 2003
- Weibull, W. A. (1951) Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, 18: 293-297, 1951
- Weller, B., Wunsch, J., Härth, K. (2005) Experimental Study on Different Interlayer Materials for Laminated Glass, Glass Processing Days 2005
- Weller, B., Reich, S., Ebert, J. (2008) Testing on Space Grid Structures with Glass as Compression Layer, Challenging Glass, Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, 2008
- Wellershoff, F., Sedlacek, G. (2003) Structural Use of Glass in Hybrid Elements, Steel – Glass Beams, Glass – GFRP Plates, Glass processing days 2003, pp. 268-270
- Wilson, P., Vasilchenko - Malishev, G. (2006) The Design and Construction of All Glass Structures, IASS 2006

## **PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA**

### **Práce súvisiace s problematikou konštrukčného skla**

- Brodniansky, J., Slivanský, M. (2006) Teoretická a experimentálna analýza sklenených prvkov, Konstrukce, ISSN 1213-8762, Roč. 5, č. 4 (2006), s. 20-22
- Slivanský, M., Brodniansky, J. (2005) Teoretická a experimentálna analýza sklenených prvkov, Teoretické a konštrukčné problémy oceľových a drevených konštrukcií, Ľahké oceľové konštrukcie, Zborník referátov z XXXI. celoštátneho aktívu pracovníkov odboru oceľových konštrukcií so zahraničnou účasťou, Mojmírovce 2005, STU v Bratislave SvF 2005, ISBN 80-227-2298-7, s. 255-260
- Slivanský, M., Brodniansky, J. (2006) Teoretická analýza sklenených prvkov, Teoretické a konštrukčné problémy oceľových a drevených konštrukcií, Seminár mladých vedeckých pracovníkov katedrií kovových a drevených konštrukcií SR a ČR, STU v Bratislave 2006, ISBN 80-227-2359-2, s. 87-88

Slivanský, M., Brodniansky, J., (2007) Problematika navrhovania nosných konštrukcií zo skla, VIII. vedecká konferencia Stavebnej fakulty TU v Košiciach, Zborník prednášok, Sekcia 2 Inžinierske konštrukcie a dopravné stavby, Kovové a drevené konštrukcie, Technická univerzita v Košiciach 2007, ISBN 978-80-8073-802-0, s. 203-208

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL AND THEORETICAL VERIFICATION OF THE RESISTANCE OF GLASS BEAMS**

The structural system must be able to fulfil throughout the lifetime of the building a wide range of different criteria and requirements. These are mainly its functionality, reliability, durability, adequate performance and aesthetic expression. Also it is important to fulfil requirements of the hygiene of internal environment and requirements of the landscape conservation.

The use of glass, as a building material, has grown in popularity in the recent past. The main reasons can be primarily found in the advances in glass production technology, which have led to higher quality of the produced glass materials. Glass is employed in most cases as a transparent component, separating the interior space from the exterior. At present it became necessary to analyze in what way glass, with its special structural behaviour, could be exploited as a structural element or part of the structural system.

Designing with glass, demands a detailed knowledge of the mechanical properties of the material. There are various ways of describing the mechanical behaviour of glass as a structural material. Some of these methods are also used in the design of constructions made of materials like steel, aluminum, concrete, reinforced concrete and timber. Nevertheless the designing with glass is still an under – developed area. Intensive theoretical and experimental research is therefore essential for ensuring the reliability and efficiency of modern structural glass systems.

The glass behaves almost totally elastic and exhibits no plastic reserves. In most cases, crucial for the design of glass elements is a stress concentration, which arises at flaws, chipped edges or at the tip of cracks on the glass surface. The extension of size and number of cracks leads to brittle fracture. Brittle fracture of a glass element is very dangerous, because its collapse is not possible to predict. Therefore studying of the methods of ensuring the residual resistance of damaged glass structures is very important.

The thesis deals with the basic knowledge of mechanical properties of structural glass and its application in design of real glass elements. The main objective of the work is to study the resistance of laminated beams made of float and fully – tempered glass in the interaction with steel elements (as reinforcement). The focus of this work is to compare experimental research and results of the theoretical models. This experimental research was motivated by a similar research executed in abroad.

## **POZNÁMKY**