



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

Meno a priezvisko:

Ing. Lucia Ondrušková

Autoreferát dizertačnej práce:

Experimentálna a teoretická analýza skrutkových spojov
v sklených konštrukciách

na získanie akademického titulu:

philosophiae doctor – PhD.

v doktorandskom študijnom programe:

téoria a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum:

Bratislava, 03.07.2023

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedre kovových a drevených konštrukcií, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Lucia Ondrušková

Katedra kovových a drevených konštrukcií
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ:

prof. Ing. Ján Brodniansky, PhD.

Katedra kovových a drevených konštrukcií
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti:

prof. Ing. Vincent Kvočák, PhD.

Oddelenie nosných konštrukcií a inteligentných adaptívnych sústav
Stavebná fakulta, TU Košice
Vysokoškolská 4, 042 00 Košice

Ing. Ľuboš Balcierák, PhD.

INGSTEEL, spol. s r. o.
Tomášikova 17, 820 09 Bratislava 29

Ing. Martin Magura, PhD.

Katedra kovových a drevených konštrukcií
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 22.8.2023 o 9:00 h na Katedre kovových a drevených konštrukcií Stavebnej fakulty STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

OBSAH

1	ÚVOD.....	4
2	CIELE A TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE	5
3	PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	5
3.1	Skrutkové spoje v sklených konštrukciách.....	5
3.2	Zvyšková odolnosť porušeného skleného prvku	5
4	EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA SKRUTKOVÉHO SPOJA V SKLE.....	7
4.1	Meracie zariadenia a priebeh experimentálneho merania.....	7
4.2	I. štádium – neporušené vzorky	9
4.3	II. štádium - vzorky s čiastočným porušením sklených vrstiev pri otvore a úplné porušenie sklených vrstiev pri otvore	9
4.4	III. štádium - vzorky s plným porušením sklených vrstiev pri otvore	11
5	NUMERICKÁ ANALÝZA SKRUTKOVÉHO SPOJA V SKLE.....	14
5.1	Model skrutkového spoja v skle – vystihnúť vplyv imperfekcií	14
5.2	Model porušenia plaveného skla pomocou materiálového modelu Johnson-Holmquist.....	18
6	ZÁVER.....	19
6.1	Odporúčania pre ďalší výskum.....	20
6.2	Odporúčania pre prax.....	21
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	23
	ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ AUTORKY	24

1 ÚVOD

Sklo, vďaka svojej transparentnosti, je obľúbeným materiálom používaným v súčasnej architektúre. Mimo tradičného použitia ako výplň okenného otvoru je používané tiež v zábradliach, presklených fasádach, prestrešeniach, v pochôdnych aplikáciach i ako materiál nosníkov, čo prináša aj zvýšené požiadavky na odolnosť sklenených prvkov. Okrem nárokov na zabezpečenie dostatočnej odolnosti neporušeného prvku, musia byť splnené aj nároky na bezpečnosť pri porušení prvku a zaistenie zvyškovej odolnosti po porušení jednej alebo viacerých vrstiev skla po potrebnú dobu.

Zvyšková odolnosť skleného prvku závisí od kombinácie použitých materiálov – typ skla, počet vrstiev skla, materiál fóliovej medzivrstvy, od typu uloženia a charakteru zaťaženia a môže v niektorých prípadoch rozhodovať o finálnej skladbe skla. Preukázanie dostatočnej zvyškovej odolnosti bude požadovať aj pripravovaná norma EN 19100 zaoberajúca sa návrhom nosných konštrukcií zo skla. V rámci problematiky určenia zvyškovej odolnosti sklenených prvkov boli vypracované viaceré výpočtové vzťahy vystihujúce vlastnosti porušeného vrstveného skla pri špecifickom type namáhania. Vzhľadom na zložitosť tohto problému je však pri overovaní zvyškovej odolnosti skleného prvku nevyhnutný experimentálny prístup. Preto je naďalej potrebný rozsiahly experimentálny a teoretický výskum pre stanovenie spoľahlivých metód pre overenie zvyškovej odolnosti skleného prvku.

Hlavným záujmom zrealizovaného experimentu, ktorý tvorí jadro tejto práce, bolo skúmanie vplyvu typu použitého skla, teploty a rýchlosti zaťažovania na zvyškovú odolnosť sklenej vzorky s bodovým úchytom po porušení jednej a oboch vrstiev skla. Zároveň pre lepšiu ilustráciu namáhania vzorky pred porušením boli sledované napätia po stranách otvoru. Experimentálny výskum bol doplnený numerickými modelmi venujúcimi sa najmä imperfekcii vyplývajúcej zo vzájomného posunu skiel a polohy aplikovaného zaťaženia a aplikácii materiálového modelu Johnson-Holmquist pre vystihnutie porušenia skleného prvku.

2 CIELE A TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

V písomnej práci k dizertačnej skúške boli stanovené nasledujúce tézy dizertačnej práce:

- Spracovanie súčasného stavu riešenia problematiky zabezpečenia a posúdenia zvyškovej odolnosti skleného prvku
- Navrhnutie metodiky experimentu a zrealizovanie skúšok vybraných prvkov zo skla
- Vytvorenie numerického modelu v software-i na báze MKP
- Porovnanie výsledkov experimentu a numerickej analýzy
- Stanovenie záverov pre rozvoj teoretických poznatkov a praktické použitie pri návrhu sklených prvkov

3 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

3.1 Skrutkové spoje v sklených konštrukciách

Bodové podoprenia sklených konštrukcií, medzi ktoré sa radia aj skrutkové spoje, sú výsledkom snahy minimalizovať hmotu podpier a do praxe sa začali uvádzať približne v polovici sedemdesiatych rokov [1]. Veľkosť napätí vznikajúcich pri skrutkovom spoji vyžaduje použitie tepelne upraveného skla. Aby sa predišlo vzniku príliš vysokých napät'ových špičiek v okolí spoja, je potrebné zamedziť priamemu kontaktu medzi sklom a oceľovými prvkami alebo ďalším skleným prvkom pomocou medzivrstvy z vhodného materiálu – zliatiny hliníka alebo syntetické materiály (polyamid, neoprén, silikón), ktorý má dostatočnú tuhosť, pevnosť a trvanlivosť. Norma STN 74 3305 [2] pri bodovom upevnení sklenej výplne zábradlia predpisuje vzdialenosť uchytenia od okraja minimálne 80 mm a nie viac ako 250 mm. Predpisuje použitie vrstveného skla, pričom jednotlivé tabule vrstveného skla musia byť tepelne spevnené alebo tepelne tvrdené.

3.2 Zvyšková odolnosť porušeného skleného prvku

Kott a Vogel [3][4] popísali tri štádiá porušenia prvku z vrstveného skla ohýbaného kolmo sa svoju rovinu. Štádium I., v ktorom sú všetky vrstvy neporušené. Pokiaľ dôjde k prekročeniu ťahovej pevnosti skla a poruší sa prvá vrstva skla nastáva štádium II a všetko zaťaženie je prenášané neporušenými vrstvami. V štádiu III. sú porušené obe vrstvy skla. Ťahové napätia v ohýbanom prvku sú prenášané fóliovou medzivrstvou a v tlačenej zóne sú fragmenty skla schopné sa do seba zakliesniť a prenášať tlakové napätia. Táto schopnosť

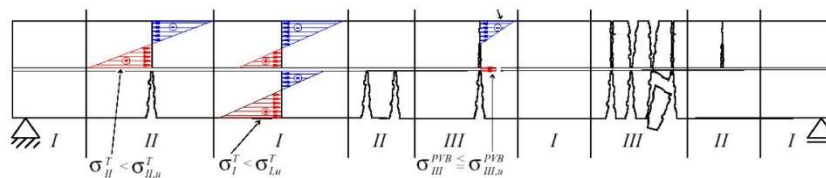
závisí od veľkosti sklenených úlomkov. V prípade použitia tepelne tvrdeného skla, ktorého úlomky majú malé rozmery, schopnosť preniesť tlakové napätia je obmedzená. Výsledkom je vznik membrány pri malých rozmeroch úlomkov alebo vznik „kĺbov“ v blízkosti lomov pri väčších fragmentoch skla [5]. Pri porušení jednej alebo viacerých vrstiev skla skleneného prvku by nemalo dôjsť k jeho náhlemu zlyhaniu.

Tuhosť vrstveného skla po porušení je vo veľkej miere ovplyvňuje [6]:

- Tuhosť fólie, ktorá závisí od materiálu fólie, dĺžky trvania zaťaženia a teploty
- Veľkosť a tvar sklenených úlomkov, ktoré závisia od typu použitého skla, charakteru zaťaženia (náraz, kvázi statické zaťaženie) a jeho rýchlosti, spôsobu uchytienia a hrúbky skla
- Priľnavosť fólie ku sklu

Zlyhanie už porušeného skleneného prvku môže nastať vzniknutím nasledovných javov alebo ich kombináciou [7]:

- Roztrhnutie fólie pôsobiacou ťahovou silou (prípadne šmykovou)
- Delaminácia sklenených fragmentov od fóliovej medzivrstvy vplyvom šmyku
- „Rozídením sa“ sklenených fragmentov v kontaktných zónach prenášajúcich tlak



Obr. 3.1: Štádiá porušenia podľa [4]

Vlastnosti vrstveného skla s dvoma vrstvami, oboma poškodenými, namáhaného ťahom možno popísať pomocou efektívnej tuhosti poškodeného vrstveného skla definovanej ako tuhosť homogénneho telesa s rovnakou geometriou ako fóliová medzivrstva pomocou efektívneho Youngovho modulu pružnosti E_{eq} [8][9]. Závisí od dĺžky črepu, dĺžky delaminácie na okraji črepu, Youngovho modulu pružnosti použitej medzivrstvy a hrúbky medzivrstvy. S. J. Bennison [8] ho vyjadril nasledovne:

V prípade ohybu kolmo na rovinu skla možno vidieť analógiu s vystuženým betónom, kde sklo prenáša tlak, podobne ako betón a fóliová medzivrstva, podobne ako oceľová výstuž, prenáša ťah. Tejto problematike sa venoval výskum v [10]. Pri prvkoch namáhaných ohybom vo svojej rovine – sklené nosníky - je zaujímavou možnosťou

zabezpečenia zvyškovej odolnosti vystuženie ťahaného okraja oceľovými pásmi [11][12] ale i inými materiálmi.

4 EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA SKRUTKOVÉHO SPOJA V SKLE

Primárnym záujmom experimentu bolo skúmanie zvyškovej odolnosti sklenej vzorky s bodovým uchytením – spôsob porušenia, únosnosť vzoriek s čiastočne porušenými sklenými vrstvami pri otvore a plne porušenými sklenými vrstvami pri otvore, a vplyvu použitého typu skla – plaveného skla a tepelne tvrdeného skla. Doplnkovo boli merané napätia po stranách otvoru pred porušením sklených vrstiev vzorky za účelom bližšieho popisu spôsobu namáhania sklených vzoriek.

V experimente boli použité 2 typy sklených vzoriek z vrstveného skla, ktoré sa líšili použitým typom skla. Prvý typ vzoriek, označený ako „ANG“, pozostával z dvoch vrstiev plaveného skla (bez ďalšieho tepelného opracovania skla). Druhý typ vzoriek, označený ako „TTG“, pozostával z dvoch vrstiev tepelne tvrdeného skla. Z každého typu vzoriek bolo po 5 ks. Vzorka mala rozmery 250 mm x 400 mm. Hrúbka jednotlivých vrstiev skla bola 8 mm a ako medzivrstva bola použitá PVB fólia hrúbky 1,52 mm – menovitá hrúbka vzorky bola 17,52 mm. Vo vzorke sa nachádzali 2 otvory priemeru 20 mm do ktorých bola umiestnená vložka vyrobená z polyamidu PA6 hr. 3 mm. Cez ňu prechádzala skrutka M14 s plným driekom, pevnostnej triedy 8.8, ktorou sa vzorka pripájala k ostatným častiam skúšobnej zostavy.

4.1 Meracie zariadenia a priebeh experimentálneho merania

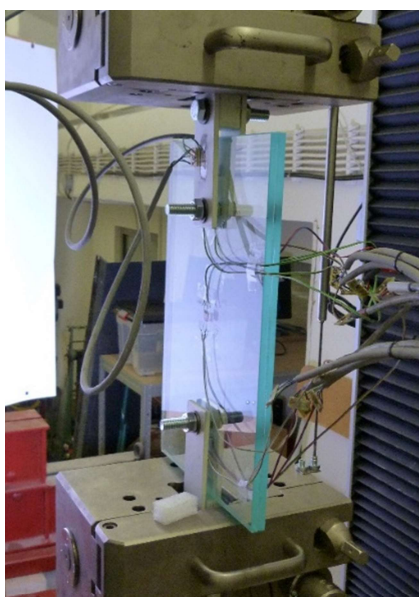
Vybrané vzorky boli doplnené tenzometrami umiestnenými po stranách otvoru, čo najbližšie k jeho okraju, z oboch strán sklenej vzorky. Slúžili na zachytenie špičiek napätí pri okraji otvoru. Použitý typ tenzometra bol HBM 1-LY11-3/120 – lineárny tenzometer s dĺžkou meracej mriežky 3 mm. Signál z tenzometrov bol prenášaný a zaznamenávaný pomocou meracej stanice Spider8 od výrobcu HBM pripojenej k počítaču cez software Catman.

Vzorky boli odskúšané v lise Testometric FS500CT. Vzorky boli až po porušenie oboch vrstiev skla pri jednom z otvorov zaťažované v cykloch. Cieľová sila v každom cykle vzrástla oproti predchádzajúcemu cyklu o 1 kN, 2 kN alebo 5 kN. Po porušení oboch vrstiev skla pri jednom z otvorov – zaťaženie sa prenášalo PVB fóliou – sa vzorka zaťažovala

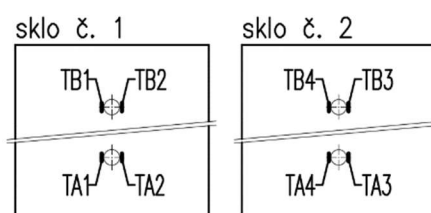
zadanou rýchlosťou až po pretrhnutie PVB fólie pri vzorkách typu ANG alebo po dosiahnutie limitov možnej deformácie v skúšobnom lise pri vzorkách typu TTG. Zvolená rýchlosť zaťažovania bola 2 mm/min, pri dvoch vzorkách (TTG3 a TTG4) bola 4 mm/min.

Experiment bol doplnený skúškou vzoriek, ktoré boli porušené pri predchádzajúcej skúške v lise len pri jednom otvore, mimo skúšobného lisu – tzv. „polovičné vzorky“. Vzorka bola zaťažovaná manuálne pomocou zaťažovania reťaze žeriava, pôsobiaca sila sa v krokoch postupne zvyšovala až do porušenia vzorky. Veľkosť kroku bola 1 až 2 kN.

Priebeh experimentu možno rozdeliť do troch štádií. V prvom štádiu bola vzorka neporušená. V druhom štádiu nastávalo porušenie jednej, prípadne oboch vrstiev skla – v tom prípade bolo podmienkou, že porušenie nastalo v rôznych miestach a nie pri tom istom otvore. V treťom štádiu boli porušené obe vrstvy skla pri tom istom otvore pri vzorkách typu ANG alebo, vzhľadom na charakter porušenia tepelne tvrdeného skla, obe vrstvy skla pri vzorkách typu TTG a zaťaženie bolo prenášané PVB fóliou. Úplné zlyhanie vzoriek nastalo pretrhnutím PVB fólie (vzorky z plaveného skla – ANG).



Obr. 4.1: Pripravená vzorka v skúšobnom lise (vľavo) a pripravená „polovičná vzorka“ na odskúšanie mimo lisu (vľavo)



Obr. 4.2: Rozmiestnenie a označenie tenzometrov (pohľad na sklo č. 2 je zo strany skla č. 1, takže tenzometer TA1 sa nachádza nad tenzometrom TA4 atď.)

Tab. 4.1: Prehľad vzoriek

Označenie vzorky	Popis vzorky	Tenzometre pri otvoroch	Teplota [°C]	Rýchlosť zaťaž. [mm/min]
ANG1	vrstvené sklo - plavené	TA1-TA4, TB1-TB4, TS1H/TS1V, TS2H/TS2V	20	2
ANG2	vrstvené sklo - plavené	TA1-TA4, TB1-TB4, TB11-TB14	21	2
ANG2-B	„polovičná vzorka“ zo vzorky ANG2	TA1-TA4, TB1-TB4, TB11-TB14	18	-
ANG3	vrstvené sklo - plavené	TA1-TA4, TB1-TB4	22	2
ANG3-A	„polovičná vzorka“ zo vzorky ANG3	TA1-TA4, TB1-TB4	18	-
ANG4	vrstvené sklo - plavené	nie	10	2
ANG5	vrstvené sklo - plavené	nie	10	2
TTG1	vrstvené sklo – tepelne tvrdené	TA1-TA4, TB1-TB4	9	2
TTG2	vrstvené sklo – tepelne tvrdené	TA1-TA4, TB1-TB4	10	2
TTG3	vrstvené sklo – tepelne tvrdené	nie	9	4
TTG4	vrstvené sklo – tepelne tvrdené	nie	9	4
TTG5	vrstvené sklo – tepelne tvrdené	nie	10	2

4.2 I. štádium – neporušené vzorky

V ideálnom prípade by sa pôsobiaca ťahová sila mala rovnomerne rozložiť na obe vrstvy skla. Napätia určené pomocou tenzometrov ukázali, že zaťaženie na jednotlivé tabule skla nebolo rovnomerne rozložené, okrem zaťaženia ťahom dochádzalo aj k ohybu vzorky.

4.3 II. štádium - vzorky s čiastočným porušením sklených vrstiev pri otvore a úplné porušenie sklených vrstiev pri otvore

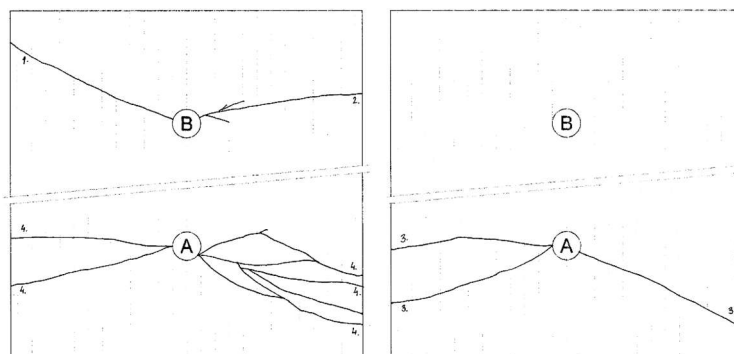
Vzorky z plaveného skla (ANG)

Porušenie sklených vrstiev nastalo buď len pri jednom z otvorov, alebo pri oboch otvoroch. V druhom prípade bola pri každom otvore jedna vrstva skla porušená, pričom toto porušenie bolo na opačných vrstvách skla. Tabule skla sa trieštili na veľké časti, charakteristické pre plavené sklo.

Prvé porušenie vzoriek nastalo pri sile 6,25 kN až 6,86 kN, s výnimkou vzorky ANG2-B, kde nastalo až pri sile 9,03 kN. Viaceré vzorky dokázali po vzniku porušenia prvej sklenej tabule preniesť vyššie zaťaženie ako pred jeho vznikom.

Keďže pevnosť skla výrazne závisí od imperfekcií na povrchu skla, ako prvé nastalo porušenie v najslabšom mieste, t. j. v mieste hlbšej trhlinky v kombinácii s miestom špičky napätia. Na základe údajov nameraných pomocou tenzometrov v blízkosti otvorov na vybraných vzorkách jedno zo skiel prenášalo výrazne vyššie zaťaženia. Po porušení viac

zaťaženej vrstvy mala neporušená vrstva kapacity prevziať zvýšené zaťaženie. Je možné, že otvor na druhej, ešte nepoškodenej, strane skla mal plytkejšie, zaoblenejšie povrchové trhlinky, alebo sa kritická povrchová trhlinka nachádzala ďalej od miesta s najvyššou špičkou napätia a tak bolo možné preniesť dokonca vyššiu silu ako pred prvým porušením.

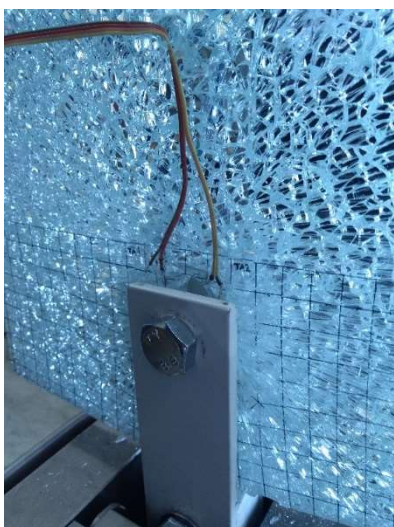


Obr. 4.3: Porušenie charakteristické pre plavené sklo - vzorka ANG1 – sklo č. 1 (vľavo), sklo č. 2 (vpravo)

Vzorky z tepelne tvrdeného skla (TTG)

Pri vzorkách z tepelne tvrdeného skla nastalo porušenie oboch skiel v jednom momente, pričom sklo sa rozrušilo na množstvo malých úlomkov. Otvor v ktorom porušenie vzniklo sa dal identifikovať podľa lúčovitého rozbíhania sa trhlín z otvoru a vzniku ihličkovitých črepín dlhých cca 10-15 mm.

Vo všetkých prípadoch, s výnimkou vzorky TTG5, boli hodnoty síl dosiahnuté pri porušení zároveň maximálne sily dosiahnuté pri experimente. Pohybovali sa od 27,61 kN do 31,92 kN. Vzorka TTG5 sa porušila pri sile 23,54 kN.



Obr. 4.4: Otvor pri ktorom vzniklo porušenie (vľavo), otvor pri ktorom nevzniklo porušenie (vpravo)

4.4 III. štádium - vzorky s plným porušením sklených vrstiev pri otvore

V treťom štádiu, keď boli obe vrstvy skla porušené, zaťaženie prenášala iba fólia. Ide o posledné štádium vzorky pred úplným zlyhaním vzorky.

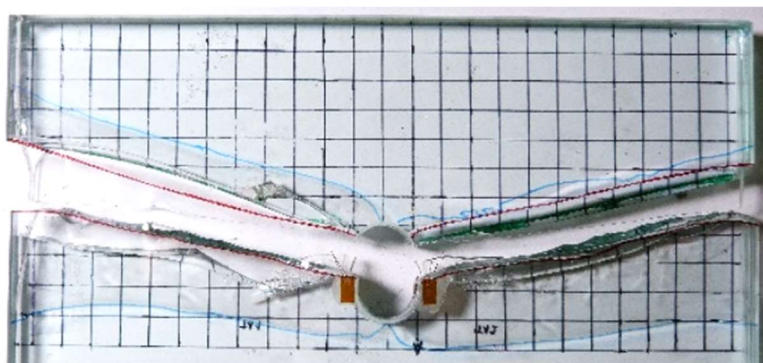
Keďže zaťažovanie nezačalo od nulovej úrovne sily, okrem absolútnych hodnôt dosiahnutých síl bola vyjadrená hodnota sily – „zvýšenie sily“ o ktorú narástlo zaťaženie pôsobiace na vzorku oproti počiatočnej sile, ktorá slúži na vykreslenie trendu rastu sily pri zväčšujúcej sa deformácii samotnej vzorky.

Vzorky z plaveného skla (ANG)

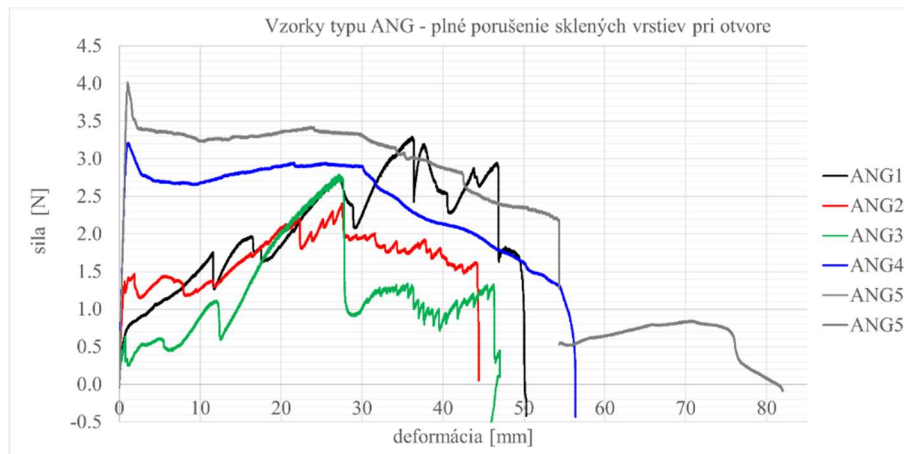
Počas ďalšieho zaťažovania vzorky s oboma porušenými vrstvami pri otvore sa fólia postupne odliepala od skla (delaminácia fólie) a dochádzalo k uvoľňovaniu črepov.

Vzorky sa dajú rozdeliť na dve skupiny: prvú tvoria vzorky ANG1, ANG2 a ANG3, ktoré boli skúšané pri teplote 20 °C (+2 °C) a druhá je tvorená vzorkami ANG4 a ANG5, skúšanými pri teplote 10 °C. Teplota mala výrazný vplyv na priebeh závislosti sily a deformácie porušenej vzorky. V skupine vzoriek skúšanej pri nižšej teplote (10 °C) pripomínal správanie sa tuhšej ionoméróvej fóliovej medzivrstvy. Na vzorkách skúšaných pri vyššej teplote (20 °C) sa delaminácia a odpadávanie črepov od fólie prejavili vznikom malých poklesov sily.

Hoci charakter priebehu závislosti sily a deformácie výrazne ovplyvňovala teplota pri experimente, maximálne dosiahnuté sily a deformácie sa pohybovali v podobných hodnotách. Je vhodné však definovať hraničnú deformáciu (resp. deformačné rozpätie), pričom do dosiahnutia tejto deformácie musí byť dosiahnutá predpísaná odolnosť vrstveného skla s oboma porušenými sklenými vrstvami.



Obr. 4.5: Delaminácia fólie od skla (vyznačené modrou líniou)

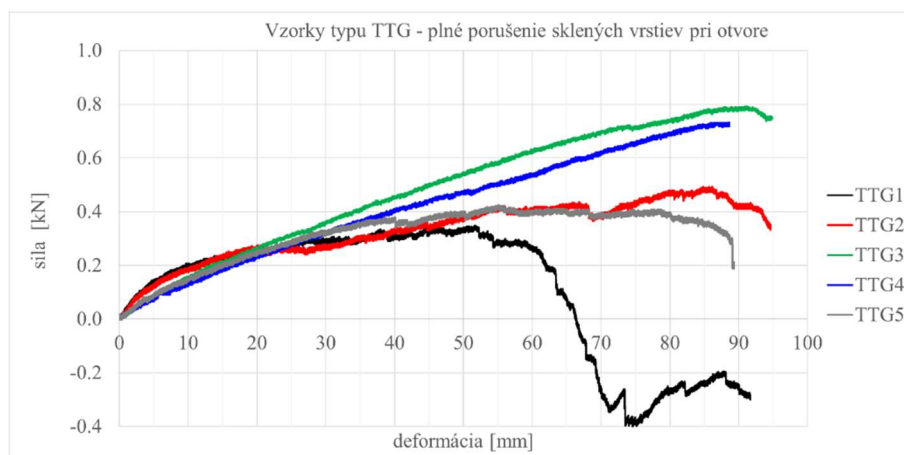


Obr. 4.6: Graf závislosti sily („zvýšenie sily“ oproti počiatočnému stavu F_1) a deformácie (deformácia sklenej vzorky d_1) pre vzorky z plaveného skla (ANG)

Vzorky z tepelne tvrdeného skla (TTG)

Na vzorkách zaťažovaných rýchlosťou 2 mm/min TTG2 a TTG5 nastalo porušenie pri otvore A umiestnenom dole a na vzorke TTG1 nastalo porušenie pri otvore B umiestnenom hore. Vzhľadom na rozdiel v tvare črepov – v prípade vzorky TTG1 sa pri hornom otvore nachádzali užšie ihličkovité črepy, tlačená oblasť nad otvorom B sa neudržala v pôvodnej polohe a oprela sa o príložku, čo viedlo k poklesu prenášanej sily pri vyšších deformáciách.

Na vzorkách zaťažovaných rýchlosťou 4 mm/min sila kontinuálne rástla až po moment, keď deformácia dosiahla hodnotu 85 mm, odkedy sa sila so zvyšujúcou sa deformáciou nezvyšovala. V prípade vyššej rýchlosti zaťažovania miesto porušenia nemalo vplyv na priebeh závislosti sily a deformácie.



Obr. 4.7: Graf závislosti sily („zvýšenie sily“ oproti počiatočnému stavu F_1) a deformácie (deformácia sklenej vzorky d_1) pre vzorky z tepelne tvrdeného skla (TTG)

Tab. 4.2: Sily a deformácie dosiahnuté v jednotlivých štádiách na vzorkách

vzorka	I. štádium	II. štádium	III. štádium		
	$F_{I, \text{štádium}}$ [kN]	$F_{II, \text{štádium.max}}$ [kN]	$F_{\text{abs.1}}$ [kN]	F_1 [kN]	d_1 [mm]
ANG1	6,254	8,405	3,716	3,296	36,193
ANG2	6,678	-	2,605	2,407	27,508
ANG2-B	9,033	9,012	-	-	-
ANG3	6,861	5,447	3,666	2,789	27,197
ANG3-A	6,855	7,836	-	-	-
ANG4	6,575	12,050	3,630	3,211	1,083
ANG5	6,737	9,050	4,156	4,019	1,048
TTG1	28,874	-	1,194	0,348	51,638
TTG2	31,924	-	1,170	0,486	84,829
TTG3	31,913	-	1,056	0,792	90,922
TTG4	27,607	-	0,641	0,733	88,572
TTG5	23,543	-	1,043	0,425	55,114
$F_{I, \text{štádium}}$ - sila dosiahnutá pri vzniku prvého porušenia $F_{II, \text{štádium.max}}$ - maximálna dosiahnutá sila pred porušením oboch vrstiev skla pri jednom otvore (a po vzniku prvého porušenia) $F_{\text{abs.1}}$ - pôsobiaca sila v skúšobnom lise F_1 - hodnota sily o ktorú narástlo zaťaženie, „zvýšenie sily“ oproti počiatočnej sile v skúšobnom lise d_1 - deformácia sklenej vzorky po porušení oboch vrstiev skla pri jednom otvore					

5 NUMERICKÁ ANALÝZA SKRUTKOVÉHO SPOJA V SKLE

5.1 Model skrutkového spoja v skle – vystihnúť vplyvu imperfekcií

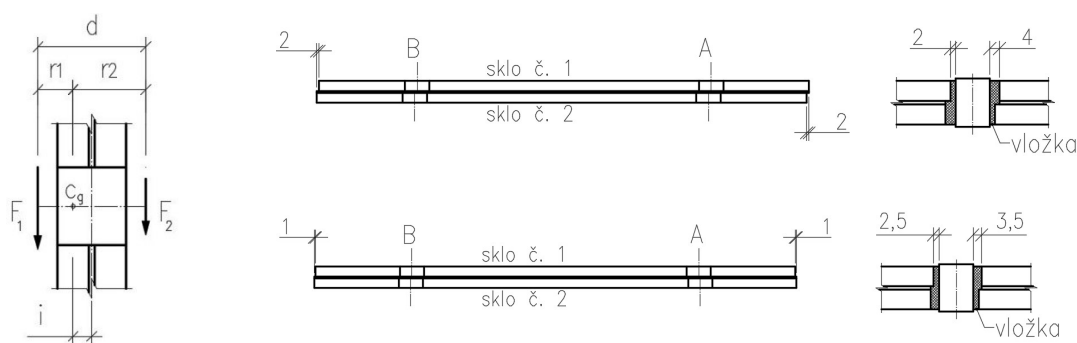
Numerická analýza sa primárne zaoberala vystihnúť vplyvu imperfekcií na rozdelenie napätí na jednotlivé sklené tabule vrstveného skla. Sekundárne bol sledovaný aj vplyv tuhosti PVB fólie a dĺžky vzorky v kombinácii s imperfekciami. Medzi vložkou a sklom boli použité dva typy nastavenia kontaktu – „pevný“ a „iba tlak“. V programe Ansys Workbench 2019 R1 [13] bola vytvorená séria modelov s nerovnomerným rozdelením sily zadávanej šmykové roviny skrutky za účelom vystihnúť imperfekciu skúšobnej zostavy. Hodnoty síl pôsobiace na jednotlivé šmykové roviny skrutky boli určené na základe zvolenej vzdialenosti ťažiska pôsobiacich síl (resp. ťažisko sústavy hmotných bodov reprezentovaných silami) i od stredovej roviny vzorky.

Pre sily F_1 a F_2 platí:

$$F_2 = \frac{F}{1 + \frac{r_2}{r_1}} \quad (5.1)$$

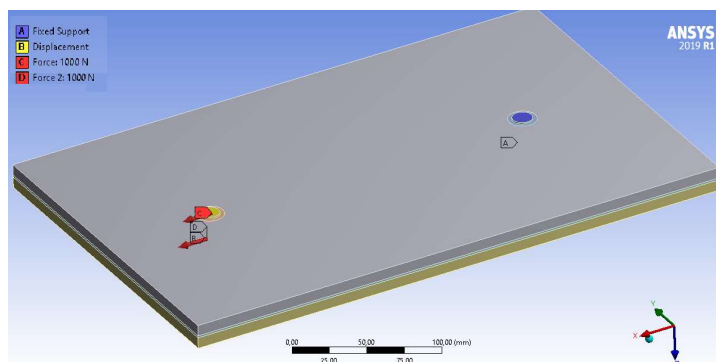
$$F_1 = \frac{r_2}{r_1} F_2 \quad (5.2)$$

Pre vystihnúť imperfekcie vzorky boli vytvorené mimo základnej geometrie ďalšie dva typy geometrie – „posun vrstiev“ a „posun „otvorov“.

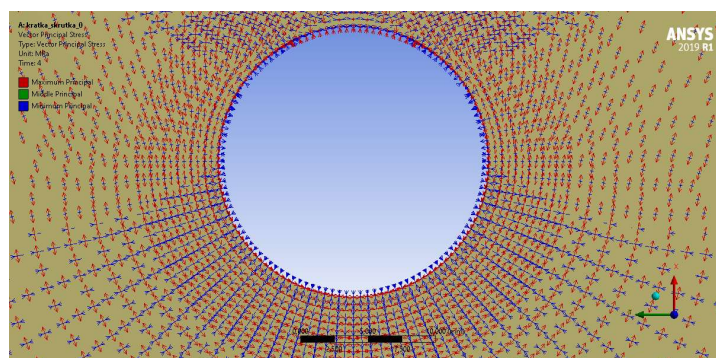


Obr. 5.1: Vzdialenosť ťažiska pôsobiacich síl od stredovej roviny vzorky (vľavo), geometria modelu „posun vrstiev“ (vpravo hore), geometria modelu „posun otvorov“ (vpravo dole)

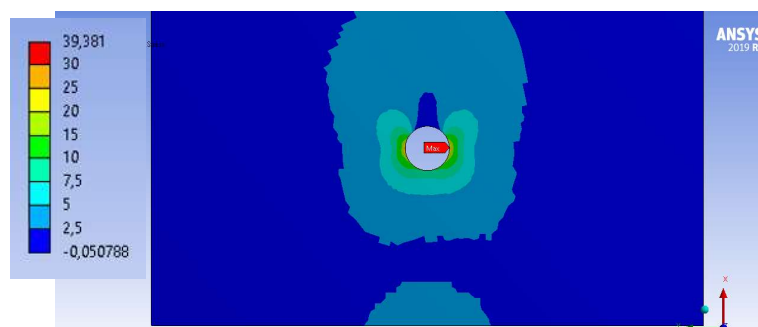
Predpoklad, že sa skrutka cez vložku oprie iba do jednej vrstvy skla pri jednom z otvorov bol ilustrovaný modelom, kde skrutka pri otvore B prechádzala iba jednou vrstvou skla.



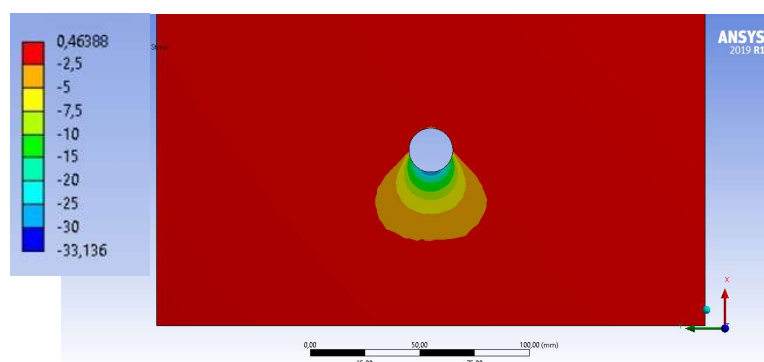
Obr. 5.4: Numerický model



Obr. 5.2: Vektorové zobrazenie hlavných napätí pri otvore



Obr. 5.3: Priebeh maximálnych hlavných napätí σ_1



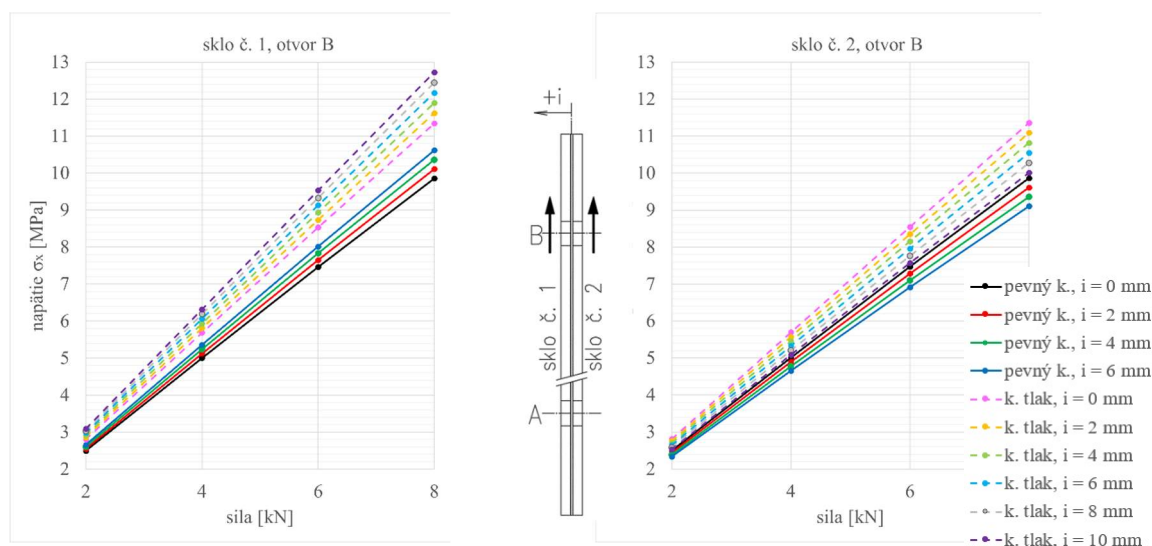
Obr. 5.4: Priebeh minimálnych hlavných napätí σ_2 pri otvore

Napätia σ_x vo vzdialenosti 3,25 mm od okraja boli porovnané s napätiami získanými v experimente pomocou tenzometrov v týchto miestach. S výsledkami na modeloch s rôznymi nastaveniami vzdialenosti i ťažiska pôsobiacich síl od stredovej roviny vrstveného skla boli porovnávané experimentom získané napätia pri každom otvore samostatne.

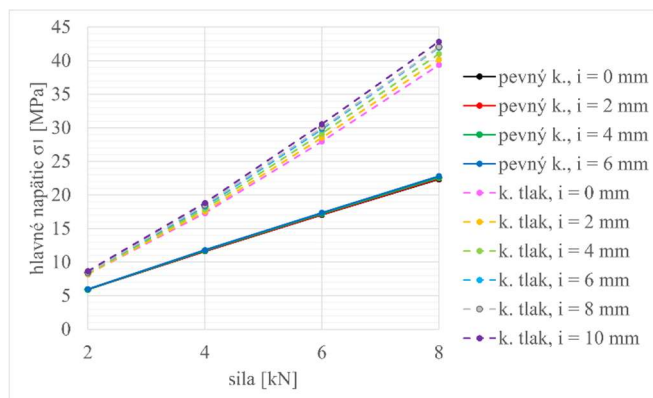
Použité boli dva typy porovnaní:

- rozdiel napätí medzi experimentom a numerickým modelom
- percentuálny pomer, kde sa numerický model považoval za východiskový

Maximálny percentuálny pomer porovnávaných priemerných hodnôt napätí z experimentu a numerickej analýzy bol 28 %. Pri použitom rozsahu modelov je to akceptovateľná hodnota. Ďalšie zníženie tejto hodnoty by bolo dosiahnuté rozšírením súboru modelov o ďalšie variácie v zmene geometrie, v posune ťažiska síl a pod.



Obr. 5.5: Závislosť hodnoty napätia v smere x vo vzdialenosti 3,25 mm od okraja otvoru (miesto tenzometra) od pôsobiacej sily – vplyv nastavenia kontaktu



Obr. 5.6: Závislosť maximálnej hodnoty hlavného napätia σ_1 od pôsobiacej sily – vplyv nastavenia kontaktu

Tab. 5.1: Porovnanie napätí z experimentu (6. zaťažovací cyklus) s napätiami získanými v numerických modeloch σ_x vo vzdialenosti 3,25 mm pri pôsobiacej sile 6 kN – vybrané vzorky

vzorka / model	otvor	sklo č. 1			sklo č. 2			trend pomeru rozdel. napätí *
		TA1/TB1 [MPa]	TA2/TB2 [MPa]	priemer	TA3/TB3 [MPa]	TA4/TB4 [MPa]	priemer [MPa]	
ANG1	B	15,09	13,44	14,26	0,38	-0,02	0,18	79,22
zaťaž. pôs. na 1 vrstvu	B	19,94	19,93	19,94	0,41	0,43	0,42	47,48
porovnanie**		4,85	6,49	5,68	0,03	0,45	0,24	-
porovnanie***		24,32 %	32,56 %	28,49%	-	-	-	-
ANG3	A	8,96	8,58	8,77	7,77	9,54	8,66	1,01
k. tlak, bez pos., i = 0	A/B	7,47	7,47	7,47	7,47	7,48	7,48	1,00
porovnanie**		1,49	1,11	1,30	0,30	2,06	1,18	-
porovnanie***		19,95 %	14,86 %	17,40%	4,02 %	27,54 %	15,78%	-
TTG2	A	8,52	5,14	6,83	8,30	7,02	7,66	1,12
k. tlak, bez pos., i = 6	B	6,92	6,92	6,92	8,01	8,02	8,02	1,16
porovnanie**		1,60	1,78	0,09	0,29	1,00	0,36	-
porovnanie***		23,12 %	25,72 %	1,30%	3,62 %	12,47 %	4,49%	-
* pomer vyššej hodnoty priemerného napätia k nižšej hodnote priemerného napätia $\sigma_{\text{priem.max}} / \sigma_{\text{priem.min}}$ ** rozdiel medzi napätiami z experimentu a numerickej analýzy $ \sigma_{\text{experiment}} - \sigma_{\text{numerickej analýzy}} $ *** percentuálny pomer napätí z numerickej analýzy a experimentu $\frac{\sigma_{\text{numerickej analýzy}} - \sigma_{\text{experiment}}}{\sigma_{\text{numerickej analýzy}}}$								

Vektor maximálnej hodnoty hlavného napätia σ_I na okraji otvoru bol orientovaný v smere osi x. Na základe výsledkov numerických modelov boli určené hodnoty rozsahu násobkov napätia v mieste tenzometra σ_x vyjadrujúce predpokladané hlavné napätie σ_I pri okraji otvoru (miesto vzniku prvej trhliny) ako 2,2 až 3,7 násobok σ_x . Medzi piatimi vyhodnocovanými vzorkami z plaveného skla (ANG) bola jedna vzorka, ktorej vypočítaná hodnota hornej úrovne pevnosti bola nižšia ako charakteristická pevnosť skla. Vo všetkých prípadoch bola hodnota spodnej úrovne pevnosti nad hodnotou návrhovej pevnosti skla [14].

Tab. 5.2: Charakteristické, návrhové pevnosti skla a „medzihodnoty pevnosti“ pre plavené sklo

veličina	hodnota [MPa]
$f_{g,k}$	45
$f_{g,d}$	14,8

Tab. 5.3: Odhad hodnoty hlavného napätia na okraji otvoru pri porušení vzorky vyjadrujúce predpokladanú pevnosť materiálu pri vzniku porušenia

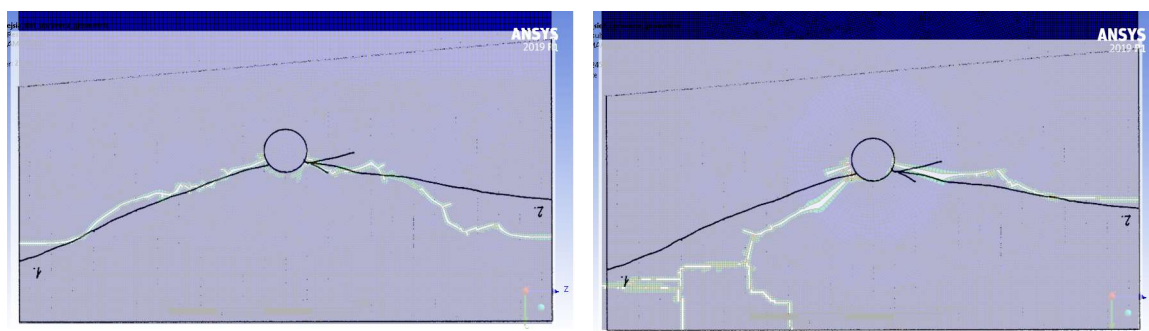
vzorka	sila* [kN]	napätie v mieste tenzometra** σ_x [MPa]	hlavné napätie $\sigma_1 = 2,2 \sigma_x$ (spodná úroveň pevnosti) [MPa]	hlavné napätie $\sigma_1 = 3,7 \sigma_x$ (horná úroveň pevnosti) [MPa]
ANG1	6,254	15,779	34,714	58,382
ANG2	6,678	10,953	24,097	35,050
ANG2-B	9,033	19,831	43,628	73,375
ANG3	6,861	12,682	27,900	46,923
ANG3-A	6,855	17,558	38,628	64,965

* sila pri vzniku prvého porušenia
 **napätie v mieste tenzometra, ktorý bol v mieste vzniku prvej trhliny pri prvom porušení

5.2 Model porušenia plaveného skla pomocou materiálového modelu Johnson-Holmquist

Materiálový model Johnson Holmquist sa používa na simuláciu porušenia sa krehkých materiálov za pôsobenia veľkého tlaku, šmykového pretvorenia a vysokej rýchlosti pretvorenia. Pri použití materiálového modelu Johnson-Holmquist na modelovanie šírenia trhlín v plavenom skle so skrutkovým spojom malo na výsledný tvar trhlín, popri veľkosti siete, vplyv geometrické usporiadanie siete.

V experimente pri porušení prvej vrstvy skla vznikali dve až tri trhliny po stranách otvoru a tento stav vzniku trhlín najlepšie vystihol model s nepravidelným usporiadaním siete. Koncentrické nastavenie siete realisticky vystihlo rozdielny sklon trhlín po stranách otvoru.



Obr. 5.7: Vizuálne porovnanie výsledkov na modeli „Sieť 1 mm“ (vľavo) a „Sieť 1 mm + inflation“ (vpravo) s porušením vzorky ANG4 pri otvore B

6 ZÁVER

Hlavným cieľom práce bolo skúmanie pôsobenia skla v nosných konštrukciách. Výskum prezentovaný v práci bol zameraný na zvyškovú odolnosť prvkov s bodovým úchytom a spôsob roznosu zaťaženia pri tomto type uchytenia. Práca venuje aj problematike zvyškovej odolnosti a v súvislosti s trendmi v súčasnej architektúre rozoberá aktuálne témy.

Z výsledkov experimentálnych meraní je možné formulovať nasledovné závery:

- potvrdil sa priaznivý vplyv použitia tepelne tvrdeného skla na odolnosť neporušených prvkov zo skla s bodovým úchytom. Vzorky z tepelne tvrdeného skla (TTG) dosahovali približne 4,5 krát vyššiu odolnosť ako vzorky z plaveného skla (ANG).
- vzorky z plaveného skla (ANG), s výnimkou jednej vzorky, preukázali po vzniku prvého porušenia pri otvore na jednej zo sklených vrstiev schopnosť preniesť zvýšené zaťaženie neporušenou vrstvou skla, pričom pri čiastočnom porušení vzorky bola dosiahnutá odolnosť aspoň 80% z pôvodnej odolnosti neporušenej vzorky.
- pre vzorky z plaveného skla (ANG) bolo možné definovať charakteristický sklon trhlín porušenia prvej vrstvy skla pri otvore ako 20° - 25° na jednej strane otvoru a 9° - 10° , resp. vznik dvoch trhlín so sklonom 0° a $22/23^{\circ}$, na druhej strane otvoru.
- na vzorkách z tepelne tvrdeného skla (TTG) schopnosť preniesť zvýšené zaťaženie pri čiastočnom porušení sklenej vzorky neporušenou vrstvou skla sa nepreukázala, pri vzniku porušenia sa obe vrstvy skla porušili naraz,.
- na vzorkách z tepelne tvrdeného skla (TTG) nebol tvar sklených fragmentov homogénny na celej ploche tabule skla. Okrem typického mozaikového vzoru trhlín sa objavil sa i lúčovitý vzor trhlín a vznik ihličkovitých črepov pri otvore, kde vzniklo porušenie sklenej vrstvy. Tento jav môže v niektorých prípadoch nepriaznivo ovplyvňovať zvyškovú odolnosť po porušení oboch vrstiev skla.
- zvyšková odolnosť vzoriek z plaveného skla (ANG) po porušení oboch vrstiev skla bola 1,7 až 2,6 krát nižšia ako odolnosť neporušených vzoriek.
- potvrdil sa vplyv teploty na vlastnosti PVB fólie, predovšetkým na charakter správania sa PVB fólie, ktorý sa pri nižších teplotách podobá tuhším ionomérovým fóliám.

- zvyšková odolnosť vzoriek z tepelne tvrdeného skla (TTG) po porušení oboch vrstiev skla bola 23 až 43 krát nižšia ako odolnosť neporušených vzoriek
- potvrdil sa nepriaznivý vplyv použitia tepelne tvrdeného skla na zvyškovú odolnosť po porušení oboch vrstiev skla. Zvyšková odolnosť vzoriek z tepelne tvrdeného skla (TTG) bola 3,3 krát nižšia oproti zvyškovej odolnosti vzoriek z plaveného skla (ANG)
- potvrdil sa vplyv rýchlosti zaťažovania na vlastnosti PVB fólie

Predmetom záujmu numerickej analýzy bolo vystihnúť vplyvu imperfekcií na rozdelenie napätí na jednotlivé sklené tabule vrstveného skla. Okrem vplyvu samotných imperfekcií bol v kombinácii s nimi sledovaný aj vplyv tuhosti PVB fólie a dĺžky vzorky v kombinácii s imperfekciami.

Pri vybraných vzorkách sa v rámci jedného otvoru sa podarilo určiť model s ekvivalentnou imperfekciou vystihujúcou trend pomeru rozdelenia napätí na jednotlivých sklených vrstvách. Zväčšením počtu modelov (zmena geometrie, posunu ťažiska sily, nastavenie kontaktu...) by bolo možné znížiť hodnotu percentuálneho pomeru porovnávaných priemerných hodnôt napätí z experimentu a numerickej analýzy. Pri použitom rozsahu modelov je hodnota 28 % akceptovateľná. Na základe výsledkov numerickej analýzy bol určený približný vzťah pre určenie pevnosti skla pri porušení vzorky z plaveného skla (ANG). Vo všetkých prípadoch bola hodnota spodnej úrovne pevnosti nad hodnotou návrhovej pevnosti skla.

Na modelovanie šírenia trhlín pri porušení plaveného skla bol úspešne použitý materiálový model Johnson-Holmquist.

6.1 Odporúčania pre ďalší výskum

Ako bolo očakávané, pri experimente sa ukázalo, že jednotlivé tabule vrstveného skla neboli v otvore rovnomerne zaťažené. Bolo by prínosné pre porovnanie uskutočniť sériu experimentov so vzorkami s prísnejšími požiadavkami na kvalitu ich vyhotovenia a sledovať, ako by predpokladané rovnomernejšie rozloženie zaťaženia na jednotlivé vrstvy skla ovplyvnilo odolnosť neporušených vzoriek. Pri vzorkách z plaveného skla by bolo vhodné sledovať vplyv vyššej presnosti vzoriek na redistribúciu zaťaženia v stave čiastočne porušeného skla.

V prípade overovania zvyškovej odolnosti plne porušenej vzorky pre možnosť lepšieho porovnania výsledkov by bolo vhodné po vzniku porušenia oboch vrstiev skla

zastaviť činnosť skúšobného lisu a znížiť zaťaženie vzorky na nulu a potom pokračovať v meraní.

Pre dosiahnutie úplného porušenia vzoriek s plne porušenými sklenými vrstvami z tepelne tvrdeného skla by bol potrebný väčší rozsah skúšobného lisu. Zároveň by bolo zaujímavé vykonať ťahovú skúšku vzorky z tepelne tvrdeného skla s oboma porušenými vrstvami skla rovnakých rozmerov bez otvoru, za účelom porovnania vplyvu otvoru na zvyškovú odolnosť vzorky.

Rozšírenie súboru vzoriek a okrem sledovaných parametrov ako typ skla, teplota a rýchlosť zaťaženia sledovať aj vplyv geometrie (vzdialenosti otvoru od skla, priemer otvoru) na väčšej skupine vzoriek by mohlo byť prospešným príspevkom pre komplexnejší popis problematiky zvyškovej odolnosti za použitia bodového prípoja.

Pre správny odhad materiálových charakteristík fóiovej medzivrstvy z PVB by bolo vhodné vykonať samostatné skúšky mechanických vlastností samotnej PVB fólie.

Pre presnejšie vystihnúť rozdelenia napätosti v jednotlivých vrstvách skla na základe porovnania numerického modelu s experimentom je odporúčané v ďalšom výskume rozšírenie súboru modelov o variácie zmien geometrie modelu vzorky, posunu ťažiska sily a nastavenie kontaktov v kombinácií so zmenou dĺžky vzorky a materiálových charakteristík PVB fólie

V numerickej analýze by bolo zaujímavé doplnenie modelu vzorky z plaveného skla (ANG) v II. štádiu - s porušením iba jednej vrstvy skla pri otvore, pričom porušené sklo by sa dalo namodelovať pomocou dvoch alebo viacerých objemov, pričom pri ich geometrii by bolo možné vychádzať z geometrie trhlín získaných v experimente.

Materiálový model Johnson – Holmquist použitý na modelovanie šírenia trhlín v plavenom skle by sa mohol v ďalšom výskume aplikovať na vrstvené sklo spolu s variáciami rozdelenia zaťaženia na jednotlivé vrstvy skla. Sledovaným cieľom by bolo, či dokáže vystihnúť poradie porušenia sklených vrstiev a charakteristický sklon a počet trhlín pre stranu skla porušenú ako prvú a stranu skla porušenú ako druhú v poradí. Vzhľadom na veľkosť takéhoto modelu, keďže je potrebné použiť veľmi jemnú sieť, si táto úloha vyžaduje výkonnú výpočtovú techniku.

6.2 Odporúčania pre prax

Kritériom pre posúdenie zvyškovej odolnosti skleného prvku je okrem zlyhania prvku roztrhnutím fólie aj zlyhanie prvku zosunutím sa z podpier. Do dosiahnutia kritéria na preukázanie zabránenia vypadnutia skleného prvku z podpier, ktoré môže byť vyjadrené

hodnotou deformácie – hraničnou deformáciou, musí byť dosiahnutá požadovaná zvyšková odolnosť skleného prvku preukazujúca dostatočnú schopnosť porušeného skleného prvku preniesť pôsobiace zaťaženia. V prípade použitia bodových prípojev, kde sa z jednej strany skleného prvku nachádza iba hlava skrutky, resp. diskovitá hlavica bodového úchytu, nesmie v skle po porušení všetkých vrstiev skla vzniknúť otvor väčšieho priemeru ako je priemer hlavice úchytu.

V prípade spoja ťahaného v rovine skla, experimentálne aj numericky modelovaného v tejto práci, je pre praktické úlohy v projekčnej praxi vždy nutné uvažovať s nesymetriou aplikácie zaťaženia v spoji, ktorá vplyva na rozloženie napätosti v spoji. Z predloženého výskumu je zrejmé, že aj pri značnej snahe je takmer nemožné doceliť rovnaké zaťaženie oboch sklenených vrstiev súčasne a malá excentricita resp. imperfekcia spôsobí prítlačenie resp. odľahčenie jednej z tabúl skla a jej následné porušenie.

V rámci praktického používania vrstvených skiel je nutné obzvlášť dbať na pracovný rozsah teplôt počas životnosti sklenenej konštrukcie a je nutné uvažovať vlastnosti fólie pri definovanej teplote pôsobiacej na danú konštrukciu. Z výskumu vyplýva, že teplota pri ktorej boli vzorky skúšané má vplyv na správanie sa vzorky pri zaťažovaní po porušení a výrazne vplyva na zostatkovú odolnosť skleného prvku s plne porušenými sklenými vrstvami.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] HALDIMANN, Matthias, Andreas LUIBLE a Mauro OVEREND. *Structural Use of Glass*. Zürich: IABSE-AIPC-IVBH, 2008. ISBN 978-3-85748-199-2.
- [2] STN 74 3305 - Ochranné zábradlia
- [3] KOTT, A. a T. VOGEL. Safety of laminated glass structures after initial failure. *Structural Engineering International*. 2004, **14**(2), 134–138.
- [4] KOTT, A. a T. VOGEL. Controlling the post-breakage behavior of laminated safety glass. In: *Proceedings International Symposium on the Application of Architectural Glass*. 2004.
- [5] *Guide for the Design, Construction and Control of Buildings with Structural Glass Elements*. Roma: Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2016.
- [6] SILVESTRI, M. *Sul Comportamento Post-Critico di Pannelli in Vetro Stratificato*. B.m., 2009. Università degli Studi di Parma.
- [7] DELINCÉ, Didier, Dieter CALLEWAERT, Jan BELIS a Rudy VAN IMPE. Post-breakage behaviour of laminated glass in structural applications. In: *Challenging Glass*. 2008.
- [8] BENNISON, S. J. a I. STELZER. Structural properties of laminated glass. In: *Short Course, Glass Performance Days, Tampere (Finland)*. 2009.
- [9] GALUPPI, Laura a Gianni ROYER-CARFAGNI. A homogenized model for the post-breakage tensile behavior of laminated glass. *Composite Structures* [online]. 2016, **154**, 600–615. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2016.07.052
- [10] GALUPPI, Laura a Gianni Royer CARFAGNI. Post-breakage tensile and bending response of laminated glass. In: *Challenging Glass 6: Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, CGC 2018 - Proceedings* [online]. 2018, s. 407–416. ISBN 9789463660440. Dostupné z: doi:10.7480/cgc.6.2163
- [11] LOUTER, Christian. Adhesively bonded reinforced glass beams. *HERON*. 2007, **52**(1/2).
- [12] SLIVANSKÝ, Miloš. *Experimentálne a teoretické overovanie odolnosti sklených nosníkov*. B.m., 2010. Slovenská technická univerzita v Bratislave.
- [13] ANSYS Inc. [online]. Dostupné z: www.ansys.com

- [14] FELDMANN, Markus, Maximilian LAURS, Jan BELIS et al. The new CEN/TS 19100: Design of glass structures. *Glass Structures and Engineering* [online]. 2023. ISSN 23635150. Dostupné z: doi:10.1007/s40940-023-00219-y

ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ AUTORKY

ONDRUŠKOVÁ, L. Bodové podoprenia sklených konštrukcií. In: *44. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií*. Košice: Technická univerzita Košice 2019, s. 125--132. ISBN 978-80-553-3388-5.

ONDRUŠKOVÁ, L. Bodové uchytenia v nosných systémoch presklených fasád. In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU 2019, s. 422--427. ISBN 978-80-227-4972-5.

ONDRUŠKOVÁ, L. Predbežné overenie zjemnenia siete v okolí otvoru pre bodové uchytenie skleného prvku. In: *Juniorstav 2020*. Brno: ECON publishing 2020, s. 341--346. ISBN 978-80-86433-73-8.

ONDRUŠKOVÁ, L. Skrutkový spoj v sklenom prvku namáhaný strihom a otláčením - vplyv vzdialenosti od okraja. In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU 2020, s. 490--495. ISBN 978-80-227-5052-3.

ONDRUŠKOVÁ, L. Skrutkové spoje v sklených prvkoch. *structures.sk. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií*, 2020, roč. 2., s. 27--30. ISSN 2644-6553.

ONDRUŠKOVÁ, L. Vplyv vybraných parametrov na napätia v skrutkovom spoji v skle. In: *Juniorstav 2021*. Brno: ECON publishing, 2021, s. 249--254. ISBN 978-80-86433-75-2.

ONDRUŠKOVÁ, L. -- BRODNIANSKY, J. Material model Johnson-Holmquist and its application in numerical analysis. In: *EDES 2021 - Extraordinary Dynamic Experiments and Simulations*. Les Ulis: Édition Diffusion Presse Sciences, 2021.

ONDRUŠKOVÁ, L. Skrutkový spoj vo vrstvenom skle – určenie únosnosti na základe numerickej analýzy. In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2021, s. 485--490. ISBN 978-80-227-5150-6.

ONDRUŠKOVÁ, L. -- SLIVANSKÝ, M. Vplyv okrajových podmienok na napätosť vo vrstvenom skle. *structures.sk. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií*, 2021, roč. 3., s. 37--41. ISSN 2644-6553.

ONDRUŠKOVÁ, L. -- KLAS, T. -- BRODNIANSKY, J. -- MOJTO, M. Experimentálna analýza skrutkového spoja vo vrstvenom skle. In: *Moderné trendy v navrhovaní konštrukcií z ocele, dreva, betónu a skla*. Stupava: structureSS, 2022, s. 231--236. ISBN 978-80-974153-1-0.