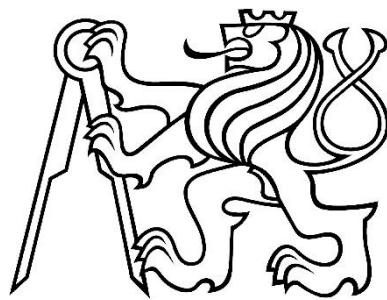


ČVUT v Praze, Fakulta stavebná

Katedra ocelových a drevených konstrukcií

Diplomová práca



Analýza skrytého kotevného bodu
pre sklenené konštrukcie

Január, 2018

Bc. Branislav Minda



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

| | | |
|--|-------------------------|-----------------------------|
| Příjmení: <u>MINDA</u> | Jméno: <u>BRANISLAV</u> | Osobní číslo: <u>410707</u> |
| Zadávací katedra: <u>K134</u> | | |
| Studijní program: <u>POZEMNÉ STAVBY - MAGISTERSKÝ</u> | | |
| Studijní obor: <u>KONSTRUKCE POZEMNÝCH STAVĚB - NC</u> | | |

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

| |
|---|
| Název diplomové práce: <u>ANALÝZA SKRYTÉHO KOTVENÍHO BODU PRO SKLENĚNÉ KONSTRUKCE</u> |
| Název diplomové práce anglicky: <u>ANALYSIS OF HIDDEN CONNECTION OF GLASS STRUCTURES</u> |
| Pokyny pro vypracování: <u>PROVEDENÍ SADY EXPERIMENTŮ, NUMERICKÝ MODEL, NUMERICKÁ STUDIE, STANOVENÍ ÚMOSHOŠTI SPOJE</u> |

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: ZDENĚK ŠKOL

Datum zadání diplomové práce: 6/10/2017 Termín odevzdání diplomové práce: 8/1/2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného pk. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

6.10.2017
Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce Ing. Zdeňka Sokola, Ph.D. s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý je súčasťou tejto práce.

V Prahe dňa 6.1.2018

.....

Podpis autora

Pod'akovanie

Táto diplomová práca bola vypracovaná na katedre oceľových a drevených konštrukcií Fakulty stavebnej ČVUT v Prahe, pod vedením Ing. Zdeňka Sokola, Ph.D.. Chcel by som hlavne poďakovať vedúcemu práce za jeho cenné rady, námety, pripomienky a podporu.

Ďalej patrí moje veľké poďakovanie doc. Ing. Martine Eliášovej, CSc. za pomoc pri hľadaní a výbere potrebných publikácií a vedeckých článkov.

Ďalej by som chcel poďakovať Bc. Stanislavovi Polatovi za ochotnú pomoc počas uskutočňovania experimentov.

Taktiež by som chcel poďakovať svojej rodine za jej podporu počas celého štúdia na škole.

Anotácia

Táto diplomová práca popisuje experimenty sklenených spojov s vloženou hlavou oceľovej skrutky, vytvorenie numerického modelu tohto spoja pomocou programu ANSYS, ktorý je totožný s uskutočnenými experimentami a parametrickú štúdiu pre rôzne priemery hlavy skrutky. Cieľom bolo určiť vplyv priemeru hlavy na únosnosť spoja v sklenených paneloch.

Kľúčové slová:

sklo, vrstvené sklo, spoje sklenených konštrukcií, spoj so zapustenou hlavou, experimentálna analýza, numerický model.

Annotation

This master thesis describes the experiments of glass panels with blind point connections, the creation of a numerical model of this connection using the ANSYS program, which is identical to the experiments performed and the parametric study for the different diameters of connection fitting. The aim was to determine the influence of the diameter of the connection fitting on the joint capacity in the glass panels.

Keywords:

glass, laminated glass, glass connections, blind point connection, experimental analysis, numerical model.

Obsah

| | |
|---|----|
| 1. Úvod | 7 |
| 2. Súčasný stav | 7 |
| 2.1. Sklo v stavebníctve..... | 7 |
| 2.2. Plavené sklo..... | 8 |
| 2.3. Pevnostne upravené sklo | 9 |
| 2.3.1. Tepelne upravené | 9 |
| 2.3.2. Chemicky upravené | 10 |
| 2.4. Vrstvené sklo..... | 10 |
| 2.5. Fyzikálne a materiálové vlastnosti skla..... | 12 |
| 3. Spoje sklenených konštrukcií | 13 |
| 3.1. Lepené spoje..... | 15 |
| 3.2. Mechanické spoje..... | 16 |
| 3.3. Súhrn riešenej problematiky..... | 24 |
| 3.3.1. Univerzita Minho, 2010 | 24 |
| 3.3.2. Univerzita Minho, 2014..... | 26 |
| 3.3.3. ČVUT Praha, 2016 | 28 |
| 4. Cieľ diplomovej práce | 31 |
| 5. Experimentálna analýza..... | 31 |
| 5.1. Popis skúšobných vzoriek | 31 |
| 5.2. Popis meracích prístrojov..... | 34 |
| 5.2.1. Skúšobné zariadenie | 34 |
| 5.2.2. Laserový extensometer | 35 |
| 5.3. Usporiadanie skúšky | 36 |
| 5.4. Vyhodnotenie experimentov | 38 |
| 5.4.1. Vzorka F3-01 | 38 |
| 5.4.2. Vzorka F3-02 | 41 |
| 5.4.3. Vzorka F3-03 | 44 |
| 5.4.4. Porovnanie výsledkov | 45 |
| 6. Numerická analýza | 46 |
| 6.1. Numerický model..... | 46 |
| 6.1.1. Vlastnosti materiálov | 46 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 6.1.2. Geometria modelu..... | 48 |
| 6.2. Vyhodnotenie modelu | 49 |
| 6.3. Parametrická štúdia | 51 |
| 6.3.1. Vstupné parametre | 51 |
| 6.3.2. Záver | 52 |
| 7. Výsledky diplomovej práce | 55 |
| 8. Témy na ďalší výskum | 56 |
| Literatúra..... | 57 |

1. Úvod

V súčasnej dobe bol postavený alebo je vo výstavbe rad nových budov, ktoré odrážajú tak ako nové trendy v architektúre tak aj nové technológie v stavebnej výrobe a materiáloch. Jedným z materiálov, ktorý ponúka nové možnosti využitia v stavebníctve je sklo. Jeho funkcia výplne otvorov sa zmenila na materiál používaný stále častejšie pre nosné prvky. Nosné konštrukcie zo skla, ktoré prenášajú zaťaženie nielen vlastnou tiažou, ale napríklad vetrom alebo úžitkové zaťaženie, sa používajú na veľkoplošné fasády, zastrešenie átrií, spojovacie mostíky, zábradlie schodov a iné. Sklo sa používa v kombinácií s ostatnými materiálmi, predovšetkým s oceľou. Konštrukčné sklo v stavebníctve umožňuje využiť významné výhody, ako sú jeho transparentnosť, trvanlivosť, odolnosť proti korózií, nevodivosť, odolnosť proti presakovaniu vody a jeho recyklovateľnosť [1].

Únosnosť a deformačné charakteristiky nosných dielcov z konštrukčného skla sú pritom zásadne ovplyvnené typom materiálu a technológií výroby, okrajovými podmienkami, charakterom zaťaženia, počiatočnými imperfekciami a ďalšími parametrami, ktorých vplyv je u klasických stavebných materiálov dlhodobo podrobne skúmaný. Pre navrhovanie a posudzovanie konštrukcií zo skla chýbajú dosiaľ znalosti, predpisy a postupy, ktoré by umožnili väčšie použitie tohoto atraktívneho materiálu, ktorý je krehký a vyžaduje preto iné pojmánie spoľahlivosti návrhu. Pokiaľ je v súčasnosti navrhnutá konštrukcia využívajúca nejaký typ skla ako nosného prvku, projektanti vychádzajú z obmedzených podkladov a predpisov a sú závislí na experimentálnom poznaní problematiky [2].

2. Súčasný stav

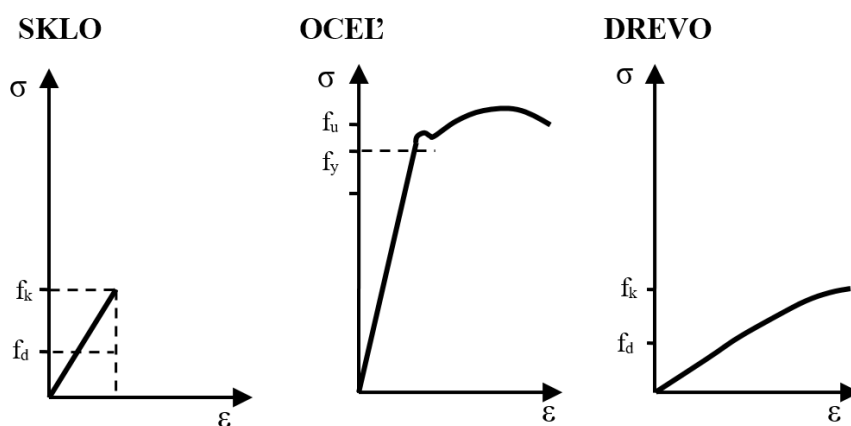
2.1. Sklo v stavebníctve

Sklo je jedným z najstarších umelých stavebných materiálov, ktorý sa využíva už niekoľko tisícročí, zatiaľ čo ploché sklo sa používa približne od 11. storočia n.l.. Súčasnú zlepšenia výrobných procesov robia sklo jedným z najmodernejších stavebných materiálov, ktorý dnes formuje vzhľad súčasnej architektúry [3]. Nespornou a jedinečnou výhodou skla je jeho transparentnosť.

Sklo možno charakterizovať ako anorganický tavný materiál, ktorý tuhne bez „kryštalizácie“. Je to visko-elastický materiál, ktorý je tuhý pri izbovej teplote, ale pri teplotách nad prechodovou oblasťou (nad cca 580 °C) je tekutý. V dôsledku chýbajúcej

kryštalickej mriežky môže cez sklo prechádzať svetlo bez obmedzenia, čo vedie k dobrej priehľadnosti a priesvitnosti skla v budovách. Zároveň je však sklo krehkým materiálom. Rozbitá sklenená tabuľa má nulovú únosnosť, čo je dôvod, prečo majú byť nosné sklenené tabule navrhované tak, aby sa predišlo náhlemu porušeniu skla [4].

Sklo na rozdiel od materiálov, ktoré môžu dosiahnuť plastické deformácie, sa chová pružne až do porušenia. Nemožno teda počítať so zmiernením vplyvu lokálnych špičiek napätia splastizovaním a následným rozdelením namáhania, ako napr. pri oceli. Na obr. 1 je porovnanie pracovného diagramu skla a oceli. Pri zaťažení v skle v ťahanej oblasti narastajú trhliny až do porušenia krehkým lomom, ku ktorému dochádza bez predchádzajúceho varovania. Porušenie skla závisí na množstve trhlín a vád v skle, na úrovni napätia a veľkosti zaťaženého povrchu, na dĺžke trvania zaťaženia. Vady a trhliny v skle vznikajú ako pri výrobe, tak aj pri úprave sklenených tabúľ [1].



Obr. 1: Pracovný diagram skla, oceli a dreva

2.2. Plavené sklo

Plavené sklo je vyrábané procesom plavenia, ktorý je v súčasnej dobe plne automatizovaný. Chemickými prísadami pri výrobe skla sú kremenný piesok, sóda, vápenec a síran sodný. Roztavené sklo je nalievané z pece do kúpeľa roztaveného cínu v chemicky riadenej atmosfére. Sklo pláva na cíne, rozprestiera sa a vytvára hladinu. Následne je sklo podrobené riadenému chladeniu a ďalšiemu spracovaniu [5].

Plavené sklo sa aj napriek pomerne nízkej pevnosti v ťahu používa v stavebníctve na sklenené panely. Pri porušení má plavené sklo tendenciu sa rozbiť na veľké a ostré kusy, a preto sa nemôže používať ako bezpečnostné sklo. Má tiež nízku odolnosť na tepelný šok.

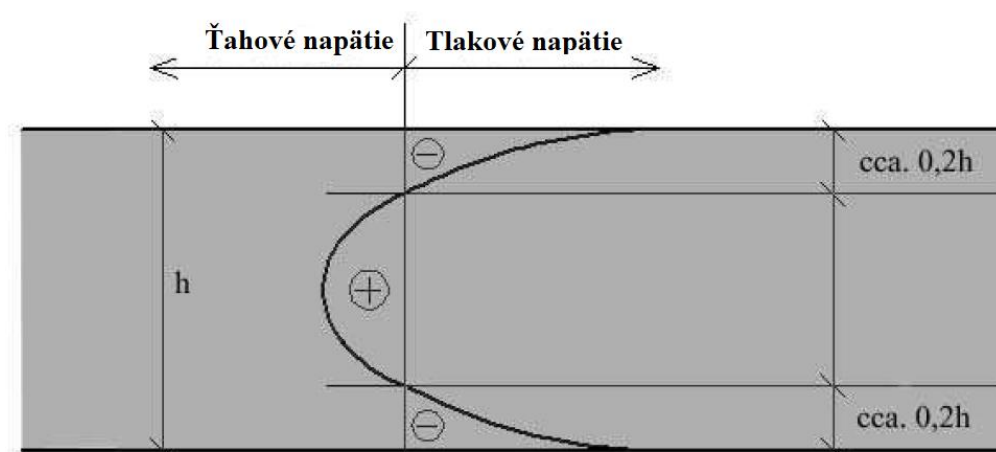
Pokiaľ je ale sklo uchytené v ráme, pri porušení z neho nevypadne a zachová si zostatkovú únosnosť [1], [6].

2.3. Pevnostne upravené sklo

Plavené sklo často nemá dostatočnú pevnosť v ťahu pre použitie na nosné konštrukcie, preto sa plavené sklo ďalej upravuje (spevňuje).

2.3.1. Tepelne upravené

Tepelne tvrdené sklo sa vyrába zahriatím plaveného skla na teplotu vyššiu ako 600 °C a následným rýchlym ochladením prúdom studeného vzduchu tak, že povrch rýchlejšie chladne ako jadro skla. To má za následok vznik tlakového napätia na povrchu skla, ktoré je v rovnováhe s ťahovým napätím v jadre (obr. 2).



Obr. 2: Rozdelenie napätia po hrúbke skla

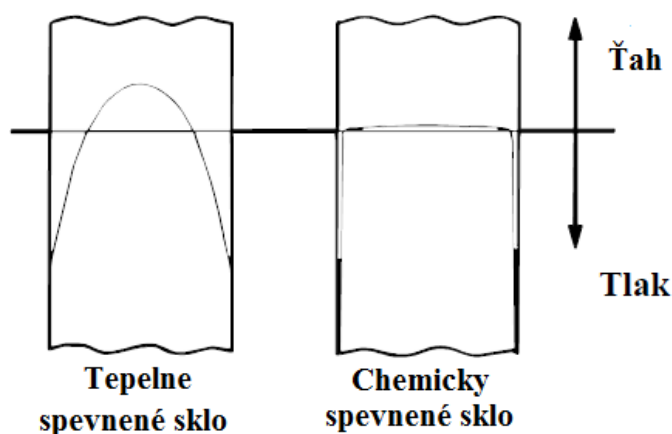
Povrchové napätie v tlaku sa zvyčajne pohybuje medzi 80 a 120 MPa, ktoré zabraňuje rastu trhlín pri ťahovom namáhaní. Tvrdené sklo je tiež mnohonásobne odolnejšie voči tepelnému namáhaniu. Pri porušení sa tvrdené sklo rozbije na malé kúsky a nezostane pokope ani keď je uchytené v ráme [7].

Tepelne spevnené sklo vzniká rovnakým spôsobom výroby ako sklo tepelne tvrdené, ale úroveň vnášaného predpätia je nižšia, medzi 35 a 55 MPa. Pri porušení sa sklo rozbije rovnako ako plavené.

Pevnostne upravované sklo je potrebné pred tvrdením alebo spevnením narezat' na požadovanú veľkosť, vrátane vrtania otvorov a úpravy hrán, pretože pri opracovaní skla až po vytvrdení by došlo k jeho porušeniu [1].

2.3.2. Chemicky upravené

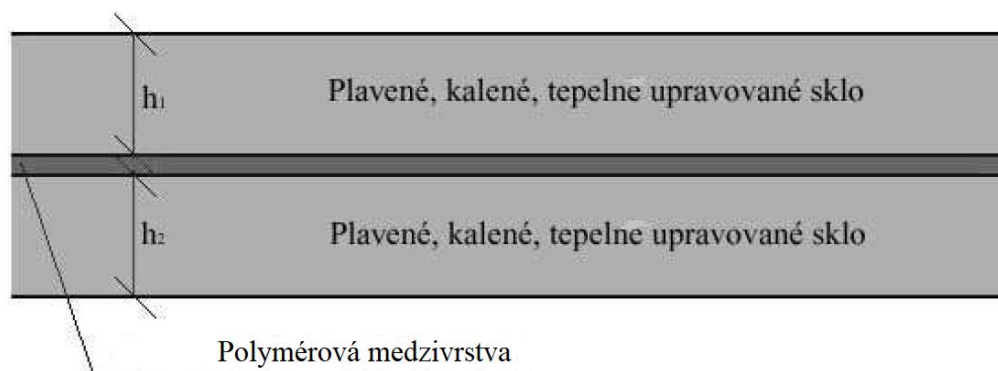
Chemicky tvrdené sklo vzniká namáčaním tabúľ skla do elektrolytického kúpeľa, v ktorom sú vymenené ióny sodíka za ióny draslíka. Ióny draslíka sú o 30 % väčšie, a tým vytvárajú vo vonkajšej vrstve tlakové napätie, obr. 3. Výhoda tohto spôsobu oproti tepelnej úprave je, že počas procesu tvrdenia dochádza k minimálnej deformácii skla a to dovoľuje výrobu tenších sklenených tabúľ. Na druhej strane hlavnou nevýhodou je to, že je výrazne drahšia ako tepelná úprava [8].



Obr. 3: Napätie v pevnostne upravených sklách [8]

2.4. Vrstvené sklo

Vrstvené (laminované) sklo sa vyrába spojením dvoch alebo viacerých sklenených tabúľ, ktoré sú spojené pomocou priehľadnej vnútornej vrstvy, vid' obr. 4. Sklenené tabule môžu mať rovnakú alebo rôznu hrúbku. Vrstvy sú zvyčajne tvorené jednou alebo viacerými polymérnymi fóliami, ktoré môžu mať hrúbku od 0,38 mm do 6 mm.

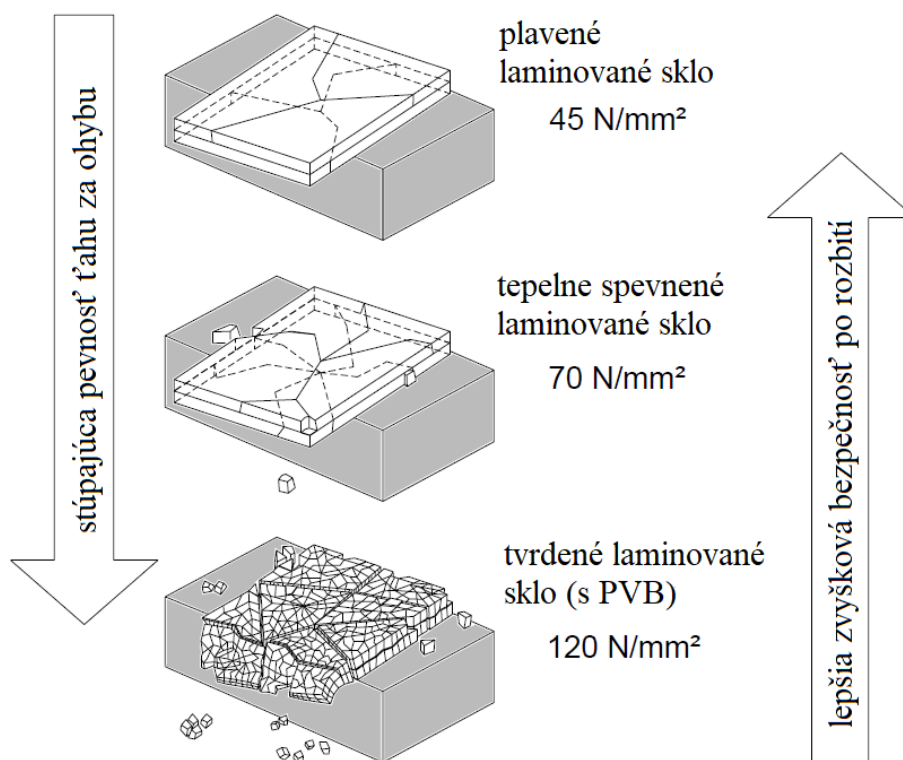


Obr. 4: Typické usporiadanie vrstveného skla

Materiáli, ktoré sa používajú na vnútornú vrstvu sú [8]:

- PVB (polyvinylbutyrál),
- TPU (termoplastický polyuretán),
- EVA (etylvinylacetát),
- PET (polyester),
- akrylát,
- ionoplast.

Vrstvené sklo výrazne zlepšuje chovanie po rozbití. Ak je tabuľa skla rozbitá, fólia bráni oddeleniu a vypadnutiu jednotlivých kúskov skla. Chovanie skla po rozbití závisí na použitom druhu skla, ale taktiež od použitého materiálu fólie, vid' obr. 5. Vrstvené sklo sa preto môže používať na zasklenie striech, prístreškov a takisto pre sklenené nosníky a stĺpy, čelné sklá áut a nepriestrelné sklá [4].



Obr. 5: Chovanie vrstveného skla po rozbití rôznych druhov skla [4]

Pri výrobe vrstveného skla sa tabule skla naskladajú v určenom poradí s medzivrstvou z polymérnej fólie na seba, predhrejú sa na 70 °C a zlisujú sa medzi valcami, kedy dôjde

k vytlačení prebytočného vzduchu. V autokláve je vrstvené sklo pri teplote 140 °C ďalej lisované pod tlakom 0,8 MPa. Ďalšou metódou laminovania je využitie liatej živice, kedy sú dve tabule skla umiestené vo zvislej polohe tesne vedľa seba a predom definovaná medzera (napr. 2 mm) je vyplnená pomocou injekčnej kvapalnej živice. Takto môžu byť vyrobené tabule skla veľkých rozmerov, pretože sa nepoužíva autokláv ani iné zariadenia. V porovnaní s polymérou fóliou, ponúkajú živice lepšiu akustickú izoláciu, ale pokiaľ dôjde k rozbitiu vrstveného skla, nezaručujú takú mieru bezpečnosti.

Obecne, aspoň pre dlhodobé zaťaženie, sa vplyv spráženia s fóliou pri návrhu neuvažuje. Preto sa pre vrstvené bezpečnostné sklo uvažuje len so súčtom pevností a tuhostí jednotlivých tabúľ. Potom už nie je treba uvažovať účinok dotvarovania pri stúpajúcej teplote a dlhodobom zaťažení. Ako ukazujú skúšky, pre krátkodobé zaťaženie, ako je poryv vetra alebo náraz, je vplyv spráženia významný.

Vrstvené sklo sa taktiež používa na protipožiarne sklo s jednou alebo viacerými špeciálnymi priehľadnými intumescenčnými medzivrstvami. Keď je vystavené ohňu, tabuľa smerujúca k plameňom sa zlomí, ale zostáva na mieste a medzivrstvy sa penetrujú, aby vytvorili nepriehľadný izolačný štít, ktorý blokuje teplo ohňa. Ďalšie použitie je tiež ako nepriestrelné sklo a sklo odolné voči výbuchu, ktoré je tvorené rôznymi medzivrstvami absorbujúcimi nárazovú energiu. V niektorých aplikáciách môže byť jedno alebo viac sendvičových sklenených tabúľ nahradených polykarbonátovou tabuľou [9].

2.5. Fyzikálne a materiálové vlastnosti skla

Sklo sa výrazne odlišuje od ostatných bežne používaných stavebných materiálov, ako je napr. oceľ. Sklo sa chová pružne až do porušenia, ku ktorému dôjde náhle a bez varovania. To je spôsobené vysokým obsahom oxidu kremičitého, ktorý má vplyv na tvrdosť a pevnosť skla, a taktiež aj na jeho krehkosť. Jednou z najdôležitejších vlastností skla je jeho vynikajúca chemická odolnosť voči mnohým agresívnym látkam, čo vysvetľuje jeho popularitu v chemickom priemysle a robí sklo jedným z najodolnejších materiálov v stavebníctve [4]. Hlavné fyzikálne a materiálové vlastnosti sú zhrnuté v tab. 1.

Tab. 1: Materiálové vlastnosti plaveného skla

| Vlastnosti skla | Hodnota | Jednotka |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Hustota ρ | 2 500 | kg / m ³ |
| Youngov modul pružnosti | 70 000 | MPa |
| Modul v šmyku G | 30 000 | MPa |
| Poissonova konštanta ν | 0,23 | - |
| Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti | $7,7 - 8,8 \times 10^{-6}$ | 1 / K |
| Tepelná vodivosť λ | 1,0 | W / (mK) |
| Sálavosť (intenzita vyžarovania) | 0,89 | - |
| Charakteristická pevnosť v tlaku | Viac než 1 000 | MPa |
| Charakteristická pevnosť v ťahu | 10 - 100 | MPa |

Pri ideálnej homogenite mikroštruktúry a nepoškodeného povrchu skla, môže teoretická pevnosť skla v ťahu dosahovať hodnoty rádovo v tisíckach MPa. Experimenty však poukázali, že skutočná pevnosť v ťahu dosahuje maximálnych hodnôt 10 – 100 MPa. Zníženie skutočnej pevnosti je spôsobené mikrotrhlinami a makrotrhlinami, ktoré sa náhodne vyskytujú na povrchu sklenených dielcov. Tieto vady môžu vzniknúť pri výrobe, vŕtaní alebo behom používania, napr. pri čistení [10].

Oproti oceli alebo hliníku, závisí pevnosť skla tiež na veľkosti skleneného prvku, dĺžke trvania zaťaženia (obecne platí, že sa pevnosť znižuje s dĺžkou trvania zaťaženia), vlhkosti (pri vyššej vlhkosti dochádza k rýchlejšiemu rastu trhlín). Pevnosť skla v tlaku je rádovo väčšia ako v ťahu, pri plavenom skle sa hodnota pevnosti v tlaku pohybuje medzi 500 – 2000 MPa.

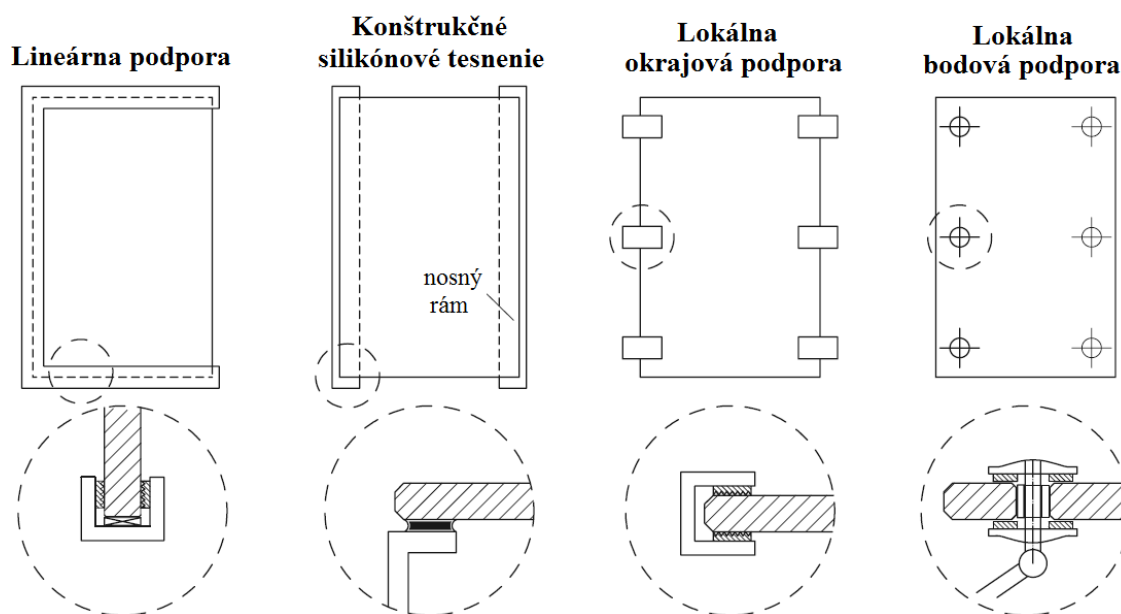
3. Spoje sklenených konštrukcií

Aplikácia skla v architektúre čelí v posledných rokoch dvom hlavným výzvam. Na jednej strane sa vyžadujú väčšie a silnejšie sklenené prvky, nielen pre fasádne obklady, ale aj pre nosné účely. Na druhej strane existuje veľká požiadavka na estetický vzhľad týchto konštrukcií, čo vedie k zdokonaľovaniu a znižovaniu ocelových plechov a skrutiek, ktoré sa používajú pre spoje [11].

Krehkosť skla predstavuje hlavnú výzvu pri spojovaní komponentov sklenenej konštrukcie. Vo všetkých prípadoch musí existovať rovnomerný prenos sily medzi sklom a

spojovacími prvkami, pomocou vhodných medziľahlých vrstiev – vložiek, ktoré sa vkladajú medzi sklo a spojovací prostriedok (skrutka). Je treba zabrániť priamemu kontaktu medzi sklom a sklom alebo sklom a kovom. Tvrdosť, tuhosť a trvanlivosť medzivrstvy majú veľký vplyv na správanie pri zaťažení sklenených tabúl. Vložka prenášajúca zaťaženie zo skla do podpory by mala mať nízky modul pružnosti podobný tomu, ktorý sa použije pri skle s dobrou trvanlivosťou a čo možno najvyššou pevnosťou v tlaku [3].

Za posledných 25 rokov sa zaznamenal narastajúci architektonický trend, aby sa pri používaní skla zvýšila transparentnosť. Tento trend sa dá vysledovať chronologickým vývojom sklenených spojov: od lineárne podporovaného zasklenia vyvinutého v polovici 20. storočia, až k bodovým skrutkovým podporám, ktoré boli vyvinuté v osemdesiatych a deväťdesiatych rokoch, vid' obr. 6. Tento vývoj ukazuje postupné znižovanie veľkosti úchytov skla a zvýšenie veľkosti a typov zaťaženia, ktoré sa prenášajú do skla [9].



Obr. 6: Zhrnutie bežných typov podoprenia skiel [9]

Pri všetkých týchto spojeniach by sa malo stále zabrániť priamemu kontaktu medzi sklom a tvrdšími materiálmi, použitím vložiek. Tieto medziprodukty majú často menšiu alebo porovnateľnú tuhosť so sklom, ale mali by mať potrebnú pevnosť materiálu a tuhosť, na prenos zaťaženia a tiež by mali mať primeranú trvanlivosť. Vhodnými materiálmi pre vložky sú plasty, živice, neoprény, injekčné malty, hliníkové alebo vláknité tesnenia. Nedávno došlo k sľubnému vývoju lepených spojov v skle. Tým sa otvoril celý rad možností, ktoré neboli

možné s mechanickými spojeniami, ale súčasne je potrebné zväžiť rad súvisiacich problémov, ako napríklad trvanlivosť lepených spojov. Tento vývoj v oblasti sklenených spojov znamená, že inžinier sa teraz stretáva so širokou škálou možných techník a výrobkov na pripojenie sklo-sklo alebo sklo k iným materiálom. Rozlišujeme medzi dvoma hlavnými typmi pripojení, menovite mechanickými spojmi a lepenými. V niektorých prípadoch môže byť spojenie kombináciou mechanického spoja a lepenia. Takéto kombinované spojenia môžu zlepšiť únosnosť spoja, avšak v prípadoch, kedy sa používajú tuhé lepidlá, je lepený spoj často podstatne tuhší ako mechanická časť spoja. Následkom toho bude lepidlo niest' väčšinu zaťaženia a mechanické spojenie nadobudne účinnosť až po prekročení kapacity lepidla [9].

3.1. Lepené spoje

Lepené spoje sú vyrobené spojením sklenených tabúľ s kovovými časťami alebo s inými sklenenými tabuľami pomocou polymérnych lepidiel. Polymérové lepidlá sa vyznačujú širokou škálou mechanických a fyzikálnych vlastností. Tieto spojenia majú tendenciu vykazovať zložitejšie správanie, ako mechanické spojenia. Mechanická odozva lepidiel závisí od teploty, dĺžky zaťaženia, starnutia, stavu zaťaženia, prípravy povrchu, chemických vlastností povrchu a niekoľkých ďalších aspektov.

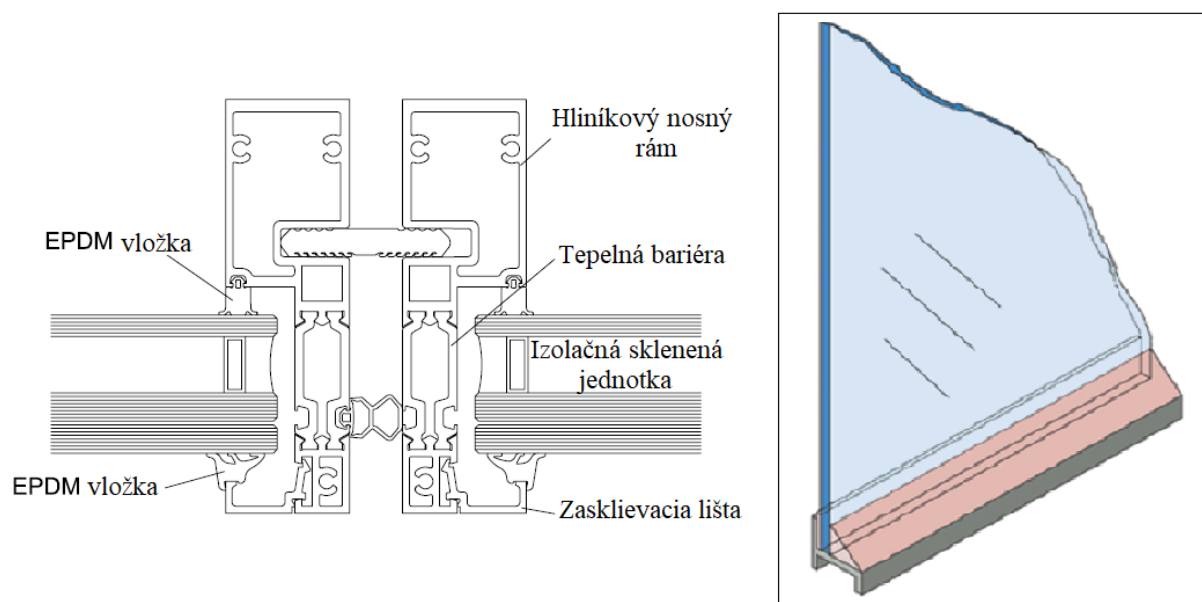
Lepené spoje poskytujú príležitosť rozložiť zaťaženia vyplývajúce zo spojov rovnomernejším spôsobom v porovnaní so skrutkovými spojmi. Je to preto, že spojenie medzi každým prvkom je homogénne v porovnaní so skrutkovými spojmi, ktoré sa vyznačujú lokálnymi špičkami napätia v okolí otvorov [8]. To je jednoznačne výhodou v sklenených spojoch, ktoré sú kvôli krehkému charakteru materiálu citlivé na koncentrácie napätia. Ďalšou výhodou lepených spojov v skle je to, že poskytujú plochu, ktorá je plochá a ľahko sa čistí, takže sa lepené spojenia pomerne ľahko konštruujú a odstraňujú potrebu predbežnej úpravy povrchu skla. Všeobecne sa na aplikácie skla používajú dva typy lepených spojov [9]:

- pružné elastické adhézne spojenie (t.j. spojenia konštrukčne silikónového tesnenia),
- tuhé adhézne spojenie (to znamená, akrylové lepidlá, epoxidové lepidlá a polyester živice).

3.2. Mechanické spoje

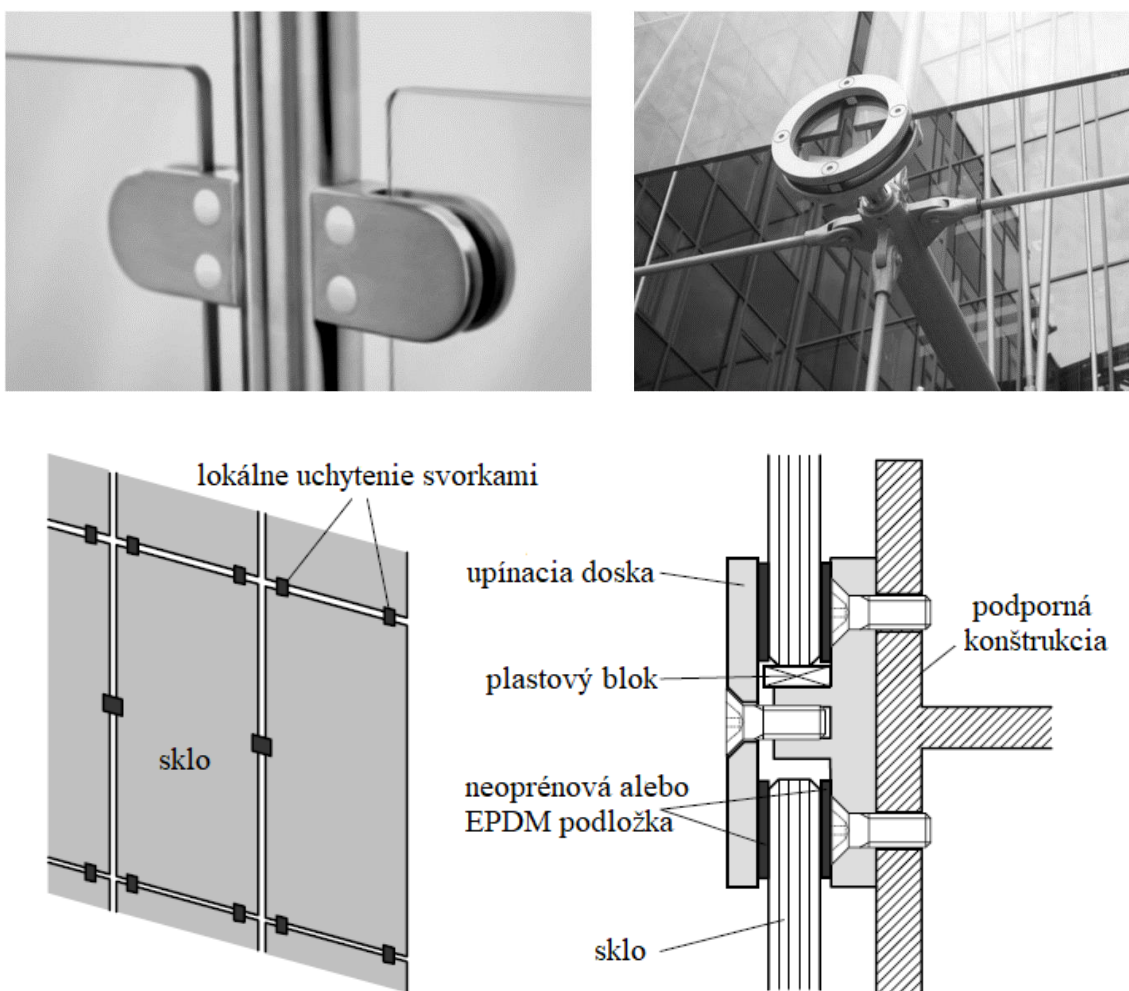
Mechanické spoje môžeme rozdeliť na viacero typov. V nasledujúcom odstavci sú vymenované a popísané hlavné typy mechanických spojení [4], [6], [9].

a) Lineárne podpory sú najjednoduchší a najrozšírejší spôsob podpory sklenených tabúľ. Často sa používajú v rámových konštrukciách, kde sklenené tabule sú podoprené pozdĺž dvoch alebo všetkých štyroch okrajov. Rámy sú zvyčajne vyrobené z hliníka, ocele, plastu alebo dreva. Vlastná hmotnosť skla sa preniesie do rámu prostredníctvom plastových blokov umiestnených na spodnom (vodorovnom) okraji skla. Ďalší spôsob, ktorým môže byť vlastná hmotnosť prenášaná do rámu, je pomocou neoprénovej vrstvy. Bočné zaťaženie, ktoré zvyčajne vzniká pri tlaku alebo saní vetra, sa prenáša zo skla do rámového systému pomocou 6 až 15 mm hrubého neoprénu, EPDM alebo silikónového tesnenia (obr. 7). Tieto podpory umožňujú dobrú rotáciu okraja skla a môžu sa preto považovať za kĺbové, pre účely analytického a numerického modelovania. Pri rámových systémoch je veľkosť rámu väčšia ako sklenená tabuľa. Táto medzera by mala byť dostatočne veľká na to, aby pokryla odchýlky, ktoré sú výsledkom výrobných alebo konštrukčných tolerancií, ako aj vnútorné odchýlky, ktoré sú výsledkom rozmerových zmien po inštalácii. Ďalšou možnosťou spojenia sklenenej tabule s rámom je vlepene skla do rámového systému.



Obr. 7: Typická lineárna sklená podpora s EPDM tesneniami a zasklievacími lištami [8],[9]

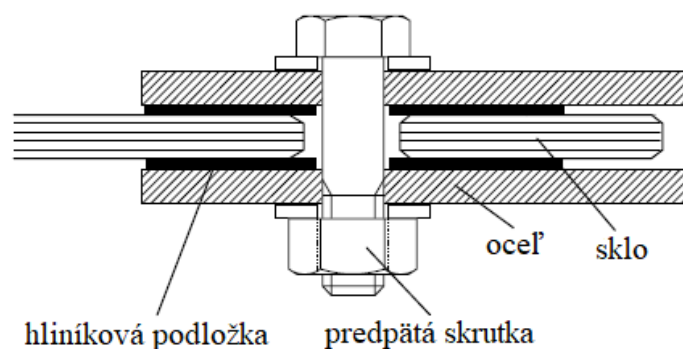
b) Svorkové a trecie uchytenia boli vyvinuté s cieľom minimalizovať vizuálny dopad lineárnych nosných rámov. Okraje panelov sú pripevnené ku konštrukcii lokálne, prostredníctvom svoriek (obr. 8). Minimalizovanie podpory prináša so sebou taktiež nevýhody, ako je vytvorenie lokálnych napätí, ktoré by mali byť zohľadnené pri návrhu konštrukcie. Na prekonanie týchto problémov sa medzi kovovú časť a sklenenú tabuľu umiestni mäkká vrstva (plastový materiál, neoprén, EPDM), aby sa znížilo lokálne napätie. Svorkové uchytenia s nízkym trením sa používajú hlavne na prenášanie zaťaženia kolmo na sklenenú tabuľu a sú v každom prípade bežným riešením pre malé sklenené prvky s menšou štrukturálnou úlohou v budovách. Typickými príkladmi sú sklenené fasády.



Obr. 8: Príklad (hore) a detail (dole) uchytenia pomocou svorky s nízkym trením [9]

Iné svorkové uchytenia sú však schopné prenášať zaťaženia v rovine tým, že sa uchytiť pevne a vytvoria trecí spoj, ktorý využíva počiatočné predpätie skrutiek. Navyše zaťaženia rozložia na väčšiu plochu, a tak sa vyhnú veľkým koncentráciám napätia. Typické zloženie

tohto spoja pozostáva zo sklenenej tabule, ocelových dosiek, ktoré sú z oboch strán skla, vložky, ktorá je medzi ocelovými doskami a sklom, a skrutiek, ktoré spájajú ocelové dosky. Priamemu kontaktu medzi sklom a ocelovými prvkami sa zabráni tým, že v skle sú väčšie otvory pre skrutky a medzi sklom a ocelovými doskami je umiestnená vložka (obr. 9). Vložka musí byť dostatočne pevná, aby odolala normálnemu namáhaniu vyvolanému predpätím skrutiek, bez toho, aby došlo k jej dotvarovaniu a musí tiež odolávať šmykovému napätiu spôsobenému zaťažením v rovine. Zároveň nesmie byť príliš tvrdá, tak aby sa poškodilo sklo a musí byť tiež dostatočne pružná, aby umožnila vyrovnáť výrobné tolerancie medzi sklom a ocelovými doskami. Navyše by mala vykazovať veľmi nízke tečenie, aby sa zabránilo znižovaniu normálnych síl v skrutkách. Typické materiáli sú čisté hliníkové alebo vláknité vložky a majú hrúbku rádovo 1 mm.

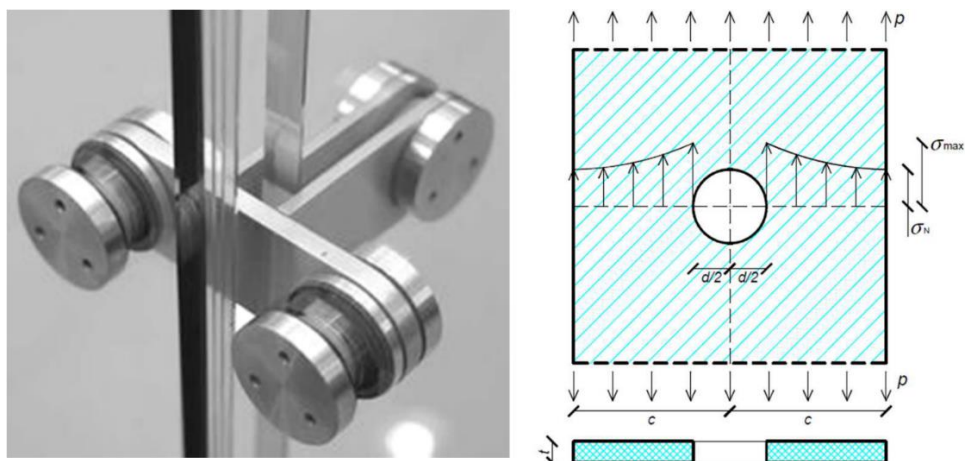


Obr. 9: Typické usporiadanie trecieho spoja [9]

c) Skrutkové uchytenie

Použitie samostatných skrutkových spojov zjavne nie je najefektívnejším spôsobom prenosu zaťaženia cez krehký materiál, ako je sklo (obr. 10) [9], [12]. Tento typ spojenia je často motivovaný estetickými požiadavkami na minimalizáciu vizuálneho dopadu podpory sklenených panelov. Avšak kvôli menšej kontaktnej ploche v skle vznikajú väčšie lokálne namáhania. Z toho dôvodu sa používa tvrdené sklo, pretože má väčšiu pevnosť v ťahu v porovnaní s plaveným sklom. Za posledných dvadsať rokov došlo k rôznym vývojom a zdokonaleniu skrutkových spojov pre sklenené konštrukcie. Výsledkom je široká škála možných prevedení skrutkových spojov.

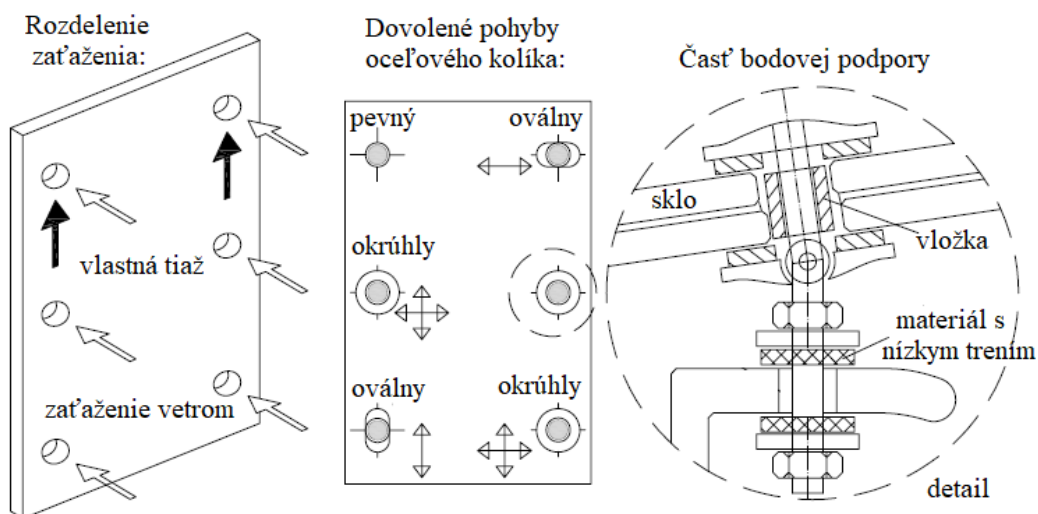
V prípade krehkých materiálov, ako je sklo, materiál nie je schopný prerozdeľovať lokálne koncentrácie napätia, a preto vysoké koncentrácie lokálneho napätia v otvore skrutiek predstavujú hlavný problém. Preto je jednou z kľúčových úloh v skle vytvoriť spoj, v ktorom sa vyhne vysokým koncentráciám napätia a priamemu kontaktu ocele so sklom.



Obr. 10: Príklad skrutkového spoja (vľavo), s typickým rozdelením napätia pri otvore (vpravo) [9]

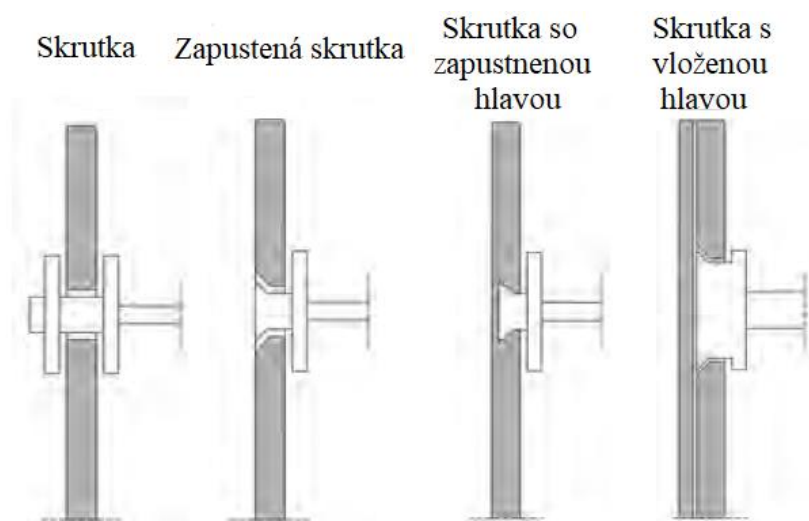
Kvalita povrchu skla a zvyškové napätie v otvoroch majú tiež veľký vplyv na nosnosť sklenených panelov so skrutkovými spojmi. Pretože maximálne ťahové napätie sa často vyskytuje v blízkosti otvorov, pre návrh je dôležitý realistický model a starostlivé prevedenie jednotlivých detailov. Zriedka je možné určiť rozloženie napätia okolo otvorov pre skrutky použitím jednoduchých vzorcov alebo grafov.

Aby sa umožnila ľahká montáž a aby sa predišlo nepriaznivým obmedzeniam v rovine (napr. kvôli teplote), mali by byť skrutky opatrne utiahnuté (napr. momentovým kľúčom < 30 Nm) a upevnené v otvore, spolu s vhodnou vložkou s nízkym trením (napr. teflón), ako je znázornené na obr. 11. Bodovo uchytené sklo by malo mať minimálnu hrúbku 8 mm a vzdialenosť otvorov od hrany skla nesmie byť menšia ako 2,5 násobok hrúbky skla.



Obr. 11: Príklad bodovo uchyteného skleneného panela [9]

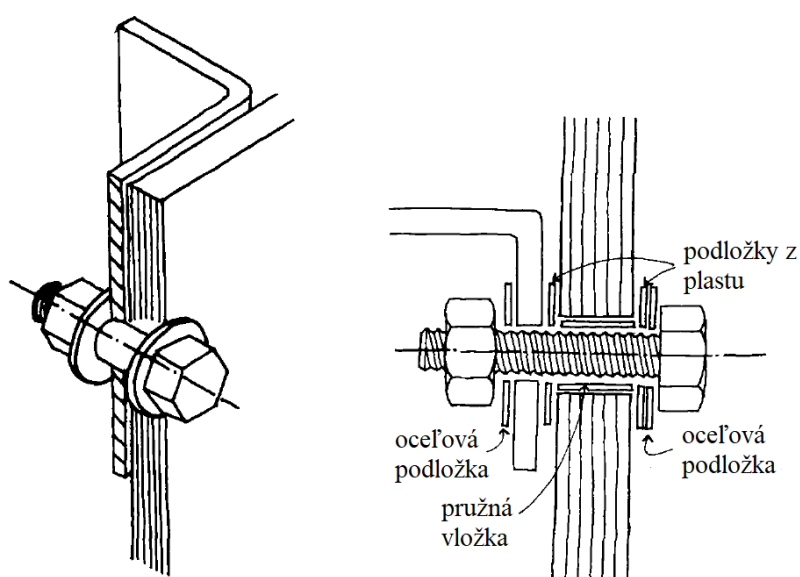
V dnešnej dobe existuje veľa typov prevedenia skrutkových spojov v sklenených tabuľách. Hlavné rozdiely sú v umiestnení skrutiek vzhľadom k rovine panelov, vid' obr. 12.



Obr. 12: Rôzne typy bodového uchytenia [11]

- Štandardný skrutkový spoj

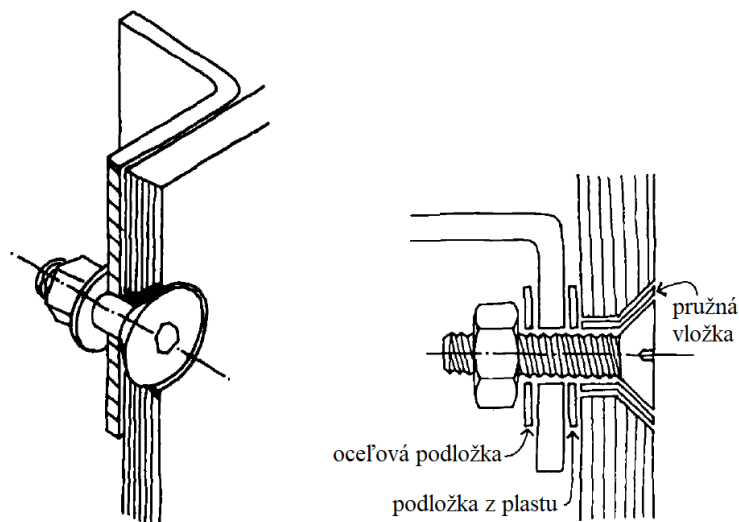
Je to najjednoduchší spoj nosných konštrukcií zo skla, vid' obr. 13, kde hlava skrutky vyčnieva z roviny zasklenia. Zaťaženie je na konštrukciu prenášané otláčením skla skrutkou, pod ktorou sa nachádza vložka z pružného materiálu. Tento typ spoja sa vyznačuje malou únosnosťou, čo spôsobuje malá styková plocha, ktorá je len v mieste kontaktu sklo – skrutka. Taktiež neumožňuje skoro žiadnu rotáciu panela, ktorý je pevne pripevnený k nosnej konštrukcii.



Obr. 13: Štandardný skrutkový spoj [6]

- Spoj so zapustenou hlavou

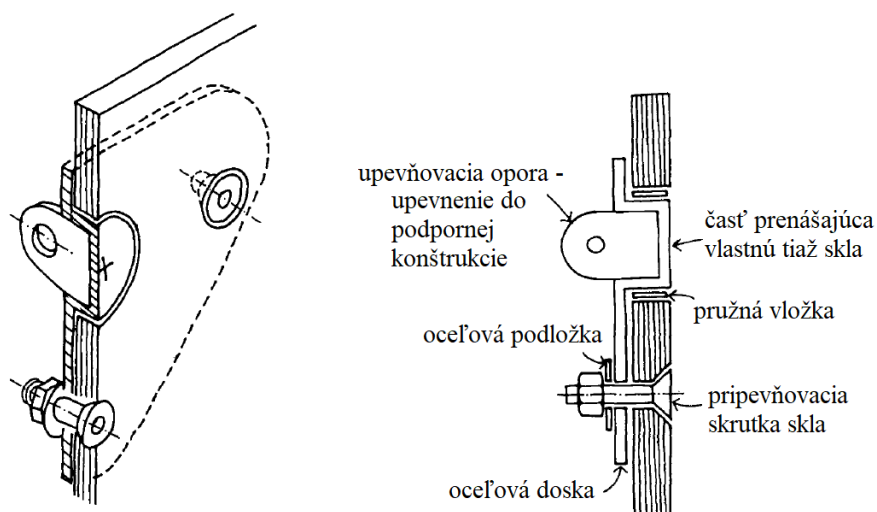
V tomto type spoja je hlava skrutky zapustená v rovine so sklom (obr. 14). Únosnosť spoja je v tomto prípade o niečo väčšia, vzhľadom k väčšej ploche, ktorá je namáhaná otlačením. Tento typ spoja neumožňuje rektifikáciu medzi sklom a oceľou, rovnako ako rotáciu panela.



Obr. 14: Spoj so zapustenou hlavou [6]

- Spoj s použitím oceľovej dosky s oporou

Hlavnou výhodou tohoto spoja je prenos zvislého zaťaženia (vlastná tiaž) pomocou opory, ktorá je súčasťou pripojovacej dosky, ako je možné vidieť na obr. 15. Vodorovné zaťaženie je prenášané pomocou skrutiek so zapustenou hlavou. Otvory v skle pre skrutky sú väčšie preto, aby sa skrutky nezúčastňovali na prenose zvislého zaťaženia. Nevýhodou je potreba vyvrtania troch otvorov do skleného panelu v jednom mieste.



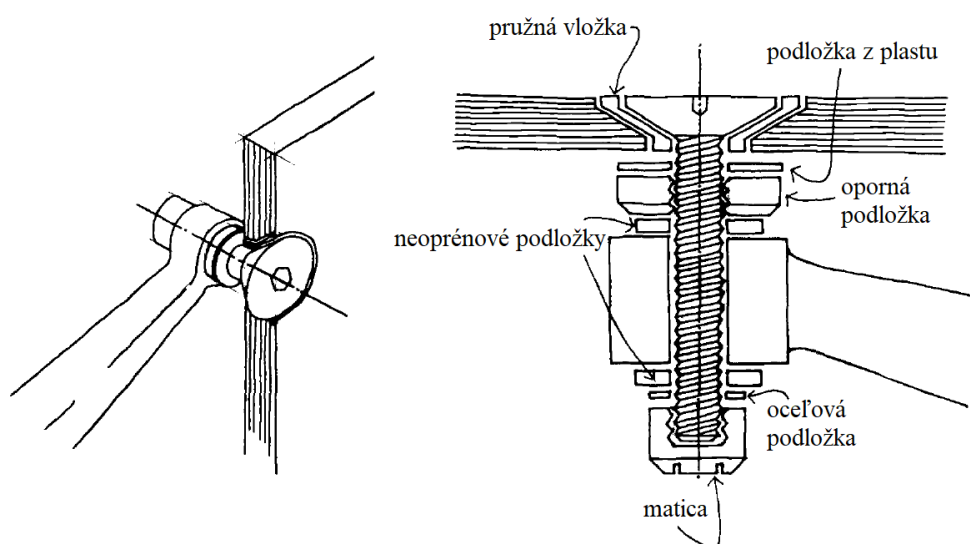
Obr. 15: Spoj s oceľovou doskou s oporou [6]

- Trecí spoj s oceľovými príložkami

Pre spoje sklenených tabúl nosných konštrukčných prvkov (nosníky, výstužné rebrá fasád) sa používajú trecie spoje. Spoj je realizovaný pomocou oceľových príložiek, vid' obr. 9. Medzi príložkami a sklom sú umiestnené plastové vložky. Skrutky sú predopnuté na predpísaný krútiaci moment, aby sa dosiahlo trecie spojenie.

- Terčový spoj so zapustenou hlavou skrutky

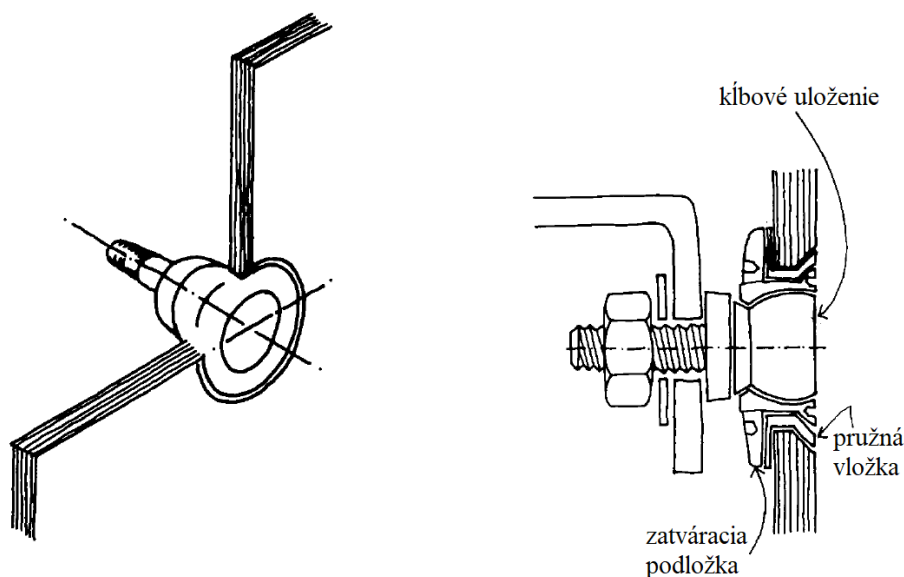
Výhodou tohoto spoja je možnosť čiastočného natočenia skleneného panelu pri použití flexibilných profilov v otvore, a takisto medzi sklom a kotviacim profilom (obr. 16). Touto úpravou sa zníži moment prenášaný skleneným panelom, čo vedie k ekonomickejšiemu návrhu spoja. Terčová podpora môže mať jedno, dve, tri alebo štyri ramená, ktoré vychádzajú zo stredu, a ktoré pôsobia ako konzoly.



Obr. 16: Terčový spoj so zapustenou hlavou [6]

- Kĺbový skrutkový spoj

Tento spoj pozostáva zo skrutky so špeciálnou guľovou hlavou, namiesto plochej hlavy štandardnej skrutky. Táto guľová hlava je usadená v ložiskovej miske, ktorá je zasunutá do skleneného panelu, vid' obr. 17. Vzhľadom k tomuto konštrukčnému usporiadaniu a použitiu vhodných distančných profilov, umožňuje tento spoj rotačné pohyby skleneného panelu okolo podpory. Z tohoto dôvodu sa do skla neprenášajú ohybové ani krútiace momenty a spoj sa chová ako kĺb.



Obr. 17: Kľbový skrutkový spoj [6]

- Spoj s vloženou hlavou

Najmodernejšiu technológiu, ktorú architekti a inžinieri v posledných rokoch vyvíjajú, je spoj s laminovanou hlavou vo vrstvenom skle. Výhodou je hlavne prerušenie tepelného mostu (skrutka neprechádza skrz sklo), eliminácia narušenia uzatvorenej medzery izolačných dvojskiel a hladký povrch (estetické kvality). Nové medzivrstvy ionomérov, ktoré majú vynikajúcu tuhosť, ako bežne používané medzivrstvy, poskytujú významné zníženie celkovej hrúbky, lepšiu čistotu a zlepšené správanie v náročných podmienkach prostredia, ktoré ponúkajú nové možnosti v sklenených spojoch, vid' obr. 18 [11].



Obr. 18: Spoj s vloženou hlavou skrutky [10]

3.3. Súhrn riešenej problematiky

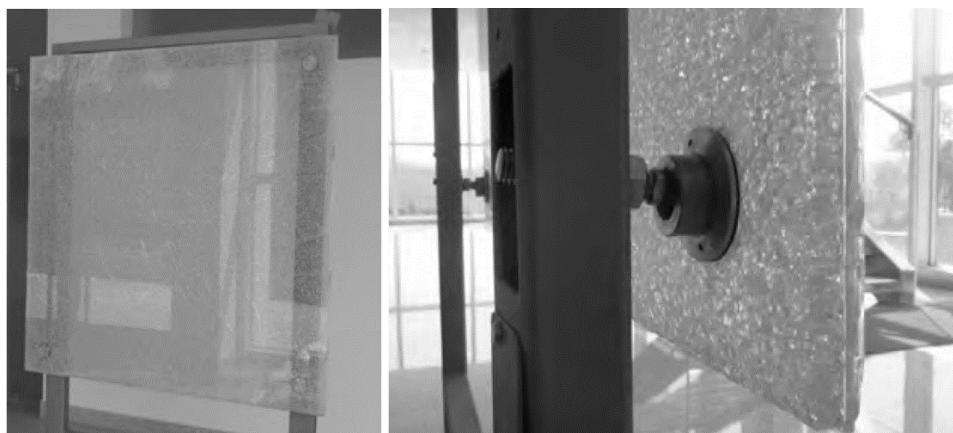
Skrutkovým spojom s vloženou hlavou umiestnenou vo vrstvenom skle sa v súčasnosti zaoberajú na rade európskych univerzít. Prehľad už uskutočnených experimentov je uvedený nižšie.

3.3.1. Univerzita Minho, 2010

Na Fakulte architektúry Univerzity Minho boli vykonané série skúšok spoja s vloženou hlavou [11]. Skúšobná vzorka pozostávala zo 6 mm hrubého skla tepelne spevneného, 2,28 mm hrubej fólie SentryGlass a 12 mm tvrdeného skla, kde bol vopred vyvrtaný otvor na umiestnenie špeciálne vyvinutého skrutkového spoja s priemerom 59 mm, vid' obr. 18. Táto sklenená tabuľa so spojom je pripojená k druhému sklu fóliou, pomocou bežného priemyselného procesu laminácie. Celkovo boli vykonané tieto typy skúšok: skúška odolnosti, skúška vysokej teploty a skúška vlhkosti.

Skúška odolnosti

Rozmery vzorky boli 1124 mm na 1085 mm. Do tvrdeného skla boli vyvrtané štyri otvory v štyroch rohoch, aby bolo možné umiestniť štyri spoje so zapustenou hlavou s priemerom 59 mm. Táto sklenená vzorka bola umiestnená vertikálne do konštrukcie. Sklenené panely boli potom úplne rozbité nárazmi pozdĺž povrchu, pomocou automatického razníka. Najskôr bolo rozbité tepelne spevnené sklo a potom tvrdené (obr. 19). Vzorka z vrstveného skla s oboma rozbitými sklami preukázala dobré správanie sa pri porušení, pretože sa nezrútila aj po niekoľkých dňoch, aj keď zostala vo zvislej polohe [11].

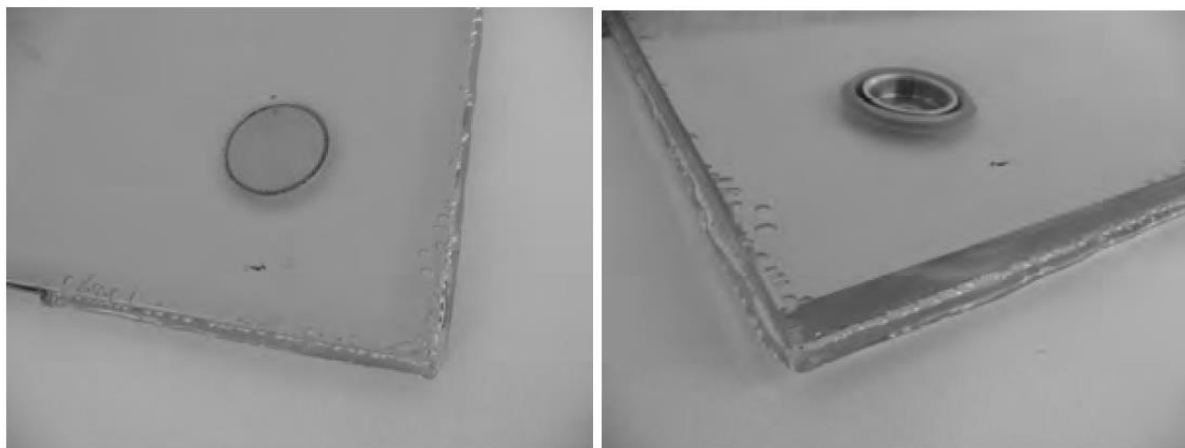


Obr. 19: Rozbitá vzorka po skúške nárazom (vľavo) a detail spoja (vpravo) [11]

Skúškou nárazom podrobili aj izolačné sklo, ktoré pozostávalo z vonkajšej vrstvy skla 6 mm, 12 mm dištančnej vložky fixovanej silikónom, 6 mm tepelne spevneného skla, 2,29 Sentryglasu a 12 mm tvrdeného skla s podobnými rozmermi ako pri predchádzajúcom teste a bola tiež testovaná za rovnakých podporných podmienok. V tomto prípade bolo len tepelne spevnené sklo rozbité, pretože to bolo jediné dostupné. Poškodené skúšobné teleso zavesené vo vertikálnej polohe nevykázalo ani po niekoľkých dňoch žiadne známky kolapsu [11].

Skúška vysokej teploty

Trvanlivosť vrstveného skla so spojom s vloženou hlavou bola overená taktiež pri skúške na vysokú teplotu. Cieľom tejto skúšky bolo vyhodnotiť, či došlo k zmene posudzovaných vlastností vplyvom výskytu bublín, delaminácie. Skúšobné vzorky boli 600 mm na 300 mm z laminovaného skla pozostávajúce z jedného 6 mm tepelne spevneného skla, jednej 1,52 mm SentryGlass fólie a jedného 12 mm tvrdeného skla. Tieto skúšobné vzorky boli zahrievané na teplotu 100 °C a udržiavané na tejto úrovni počas 16 hodín. Skúšky preukázali dostatočnú odolnosť za zvýšenej teploty, pretože v rámci 15 mm plochy okolo hrán boli iba bubliny (obr. 20), okolo uchytenia boli bubliny v okruhu 5 mm [11].



Obr. 20: Vzorka po teste na vysokú teplotu [11]

Skúška vlhkosti

Taktiež sa vykonal test vlhkosti. Jeho účelom bolo určiť účinky dlhodobého vystavenia vlhkosti, konkrétne vzniku bublín, delaminácie. Skúšobné vzorky boli podobné tým, ktoré sa použili pri teste na vysokú teplotu (obr. 21). Skúška pozostávala z udržiavania skúšobných

vzoriek pri vlhkosti približne 100 %, vertikálne umiestnených do klimatickej komory počas dvoch týždňov s približnou teplotou 50 °C. Výsledky boli tiež veľmi uspokojivé, pretože tam nebola viditeľná zmena v povrchu laminácie pri okraji a ani pri spoji.



Obr. 21: Vzorka po teste na vlhkosť [11]

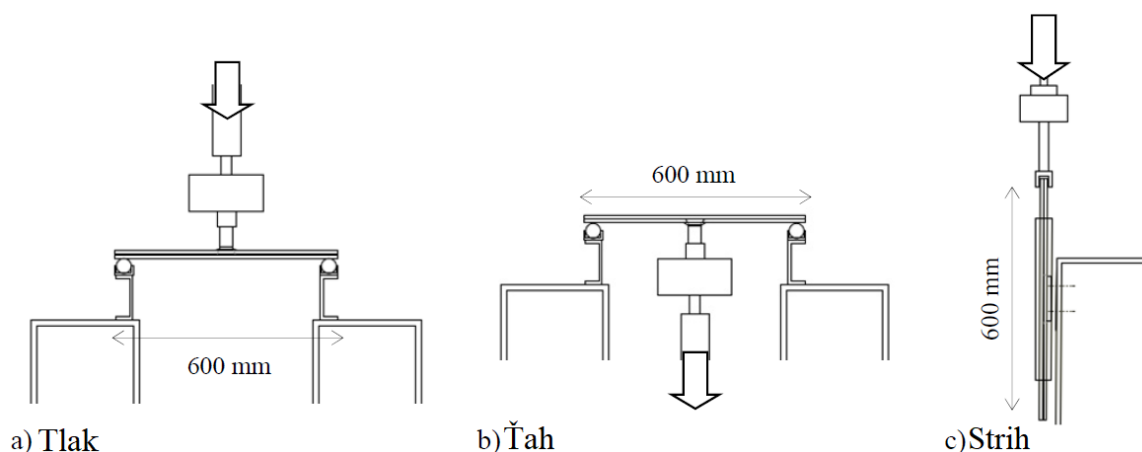
Záver

Vývoj spojov s vloženou hlavou založený na kombinácii procesu laminácie a kovových úchytov je veľmi sľubnou technikou, pretože spája výhody dostupných mechanických a lepených spojov. Predbežné experimentálne testy boli vykonané s cieľom vyhodnotiť tento typ spoja na odolnosti proti nárazu, vysokej teplote a vlhkosti podľa európskych noriem s veľmi sľubnými výsledkami. Na potvrdenie mechanického výkonu a správania sa po zlomení, sú potrebné ďalšie práce, aby sa optimalizovali hrúbky skla a fólie. Vyhýbanie sa vysokým teplotným účinkom na laminovaných hranách je tiež cieľom.

3.3.2. Univerzita Minho, 2014

Za účelom vyhodnotenia vplyvu rôznych typov fólií na štrukturálne správanie spojovacieho systému s vstavanými bodmi (tuhosť, pevnosť a deformačná kapacita) bol vykonaný súbor experimentálnych testov v laboratóriu stavebníctva a technológie Fakulty architektúry, Univerzity Minho. Ako je znázornené na obr. 22, záťažové testy boli uskutočnené v troch konfiguráciách: (a) v tlaku, (b) v ťahu a (c) na strih. Panely boli štvoruholníkové s rozmermi 600 mm. Vzorky skúšané v tlaku a v ťahu sú jednoducho podoprené na dvoch valčekoch s priemerom 48,3 mm, pričom sú vzdialené od seba 515 mm.

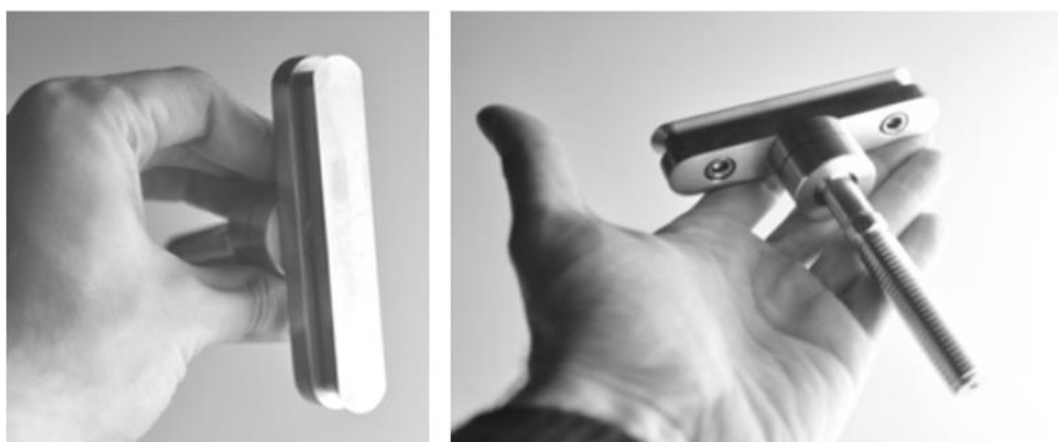
Vzorky na strih majú oválny úchyt a sú vertikálne prichytené na oceľový rám. Bočné strany sú stabilizované dvoma vodiacimi profilmi a zaťaženie sa nanáša na hornej strane [13].



Obr. 22: Usporiadanie testu [13]

Tak ako v predchádzajúcom experimente, aj tu vzorky pozostávajú zo 6 mm tepelne spevneného skla, fólie Sentryglas s hrúbkou 2,28 mm a 12 mm tvrdeného skla, kde bol predtým vyvrtaný otvor na umiestnenie špeciálne vyvinutého oceľového spoja s priemerom 59 mm. Táto oceľová časť je spojená s fóliou pomocou bežného priemyselného procesu laminovania.

Panely boli vystavené zvyšujúcemu sa monotónnemu zaťaženiu až do poruchy pri konštantnej rýchlosti deformácie 0,033 mm/s. Priemerná teplota a vlhkosť boli 23 °C a 64 %. Skúšaný bol spoj s okrúhlou a oválnou (obr. 23) vloženou hlavou a vzorky boli s PVB a SentryGlass fóliou.



Obr. 23: Oválna hlava úchytu [13]

Skúška v tlaku – okrúhla hlava

Pri teste na tlak, bez ohľadu na typ fólie, panel začal vykazovať lineárne elastické správanie až do okamihu, keď došlo k náhlej strate pevnosti spôsobenej prasknutím horného panelu z tvrdeného skla. Pri obidvoch typoch fólií po miernom zvýšení sily nastala druhá náhla strata pevnosti spôsobená prasknutím spodného tepelne spevneného skla. Hlavným rozdielom v chovaní týchto dvoch panelov je nepochybne pevnosť po porušení. Zatiaľ čo panel SG vykazuje značnú pevnosť a ťažnosť po porušení, v prípade panelu PVB je pevnosť po pretrhnutí bezvýznamná [13].

Skúška v ťahu – okrúhla hlava

Napriek rozdielnej fólii tabule začali vykazovať podobné správanie až do porušenia prvej tabule. Vo vzorke s PVB došlo k náhlej strate pevnosti spôsobenej porušením horného tepelne spevneného skla. Potom nasledovalo obnovenie sily a druhá náhla strata pevnosti bola spôsobená prasknutím spodného tvrdeného skla pri zaťažení 7,21 kN. Vo vzorke s SG došlo k vytrhnutiu úchyty pri dosiahnutí zaťaženia 9,78 kN [13].

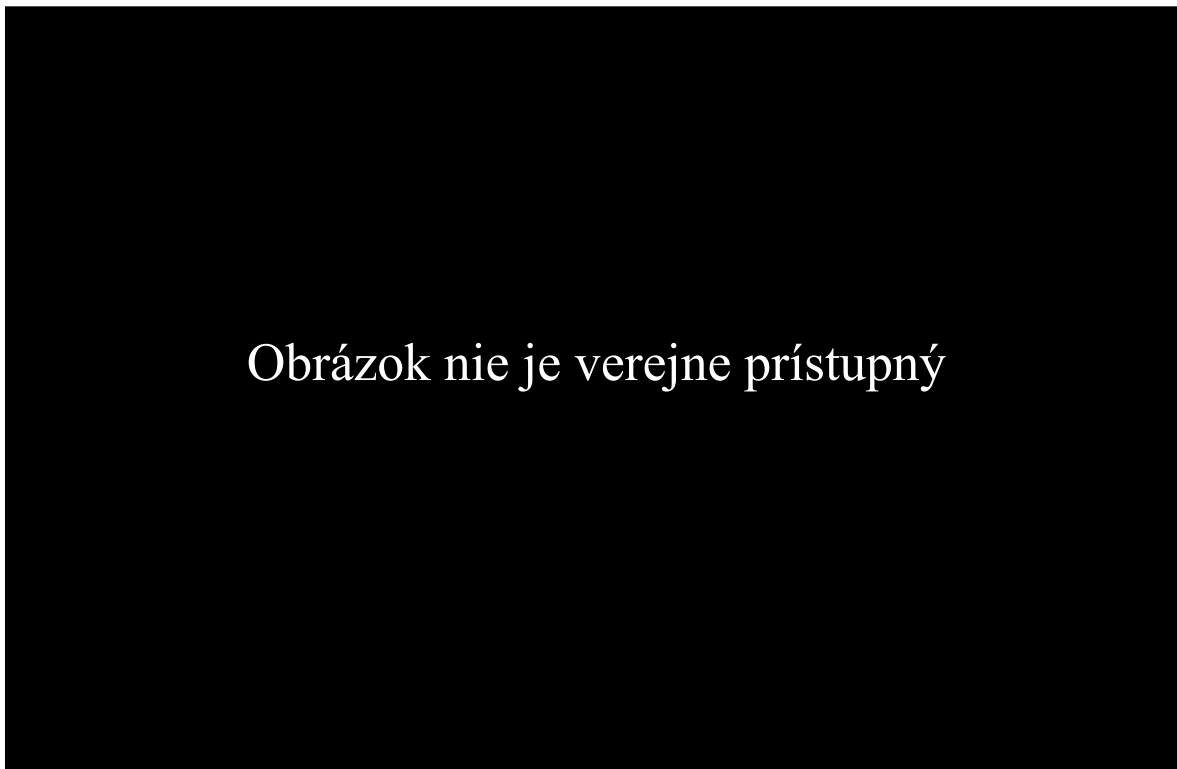
Skúška v tlaku, ťahu a strihu – oválna hlava

Pri porovnaní použitia PVB a SG fólie v skúškach na tlak, vzorky so SG dosiahli vyššiu pevnosť a tuhosť. Okrem toho panel s SG vykazuje značnú pevnosť a ťažnosť po porušení. V prípade panelu PVB je sila po porušení bezvýznamná. Rovnaké chovanie sa vyskytuje aj pri skúškach v ťahu, zatiaľ čo maximálne dosiahnuté sily boli skoro zhodné. Skúšky v strihu vykazujú značné ťažné správanie. Je to spôsobené tým, že v oboch vzorkách došlo k poruche oceľových skrutiek. Počas testu nedošlo k žiadnemu porušeniu skla, zatiaľ čo delaminácia okolo vlozenej oceľovej hlavy bola viditeľná, pričom sa zvyšovala s narastajúcim zaťažením [13].

3.3.3. ČVUT Praha, 2016

Ďalšie skúšky, ktoré sú zamerané na spoj s vloženou hlavou v sklenených konštrukciách boli uskutočnené na Fakulte stavebnej, ČVUT v Prahe [14]. Skúšobné vzorky boli označené F1-01, F1-02 a F1-03 (podrobný popis je popísaný v kapitole „5.1. Popis

skúšobných vzoriek“). Vzorky pozostávali z 10 mm hrubého plaveného skla, 4 vrstiev SentryGlass fólie (tj. 4 x 0,38 mm), 10 mm tepelne spevneného skla a vloženej hlavy ocelej skrutky. Všetky tri vzorky boli totožné, o rozmeroch 500 mm x 300 mm. Vzorky boli skúšané na ťah zaťažovaním a odťažovaním až do porušenia. Na obr. 24 je vidieť graf závislosti sily na priehybe vzorky F1-01.

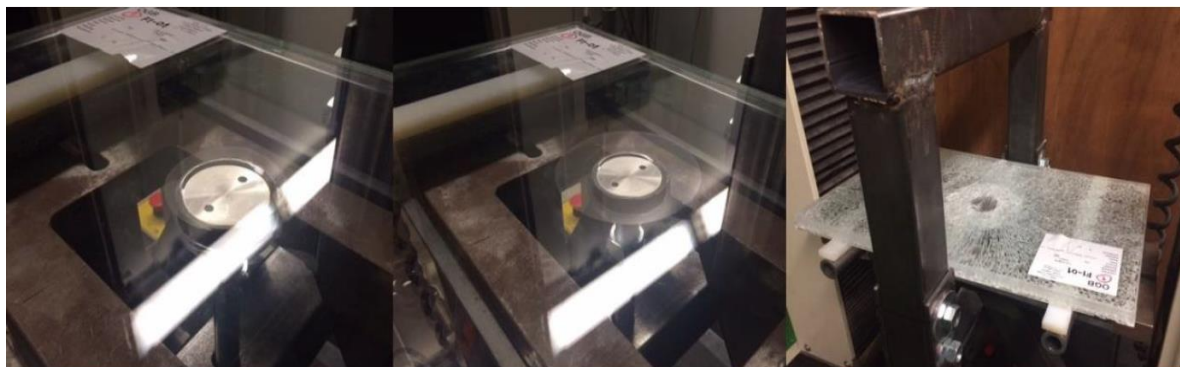


Obr. 24: Graf závislosti sily na priehybe – vzorka F1-01 [14]

1. Delaminácia oceleového úchytu od medzivrstvy sprevádzaná znížením pôvodnej tuhosti
2. Náhle zvýšenie deformácie
3. Deformácia HDPE vložiek
4. Krehké zlyhanie sklenených tabúl

Všetky tri vzorky mali rovnaký spôsob porušenia. Prvou vadou vo vzorke bola vždy delaminácia ocelej skrutky od fólie, čo malo za následok poklesom tuhosti. Porušenie bolo opäť iniciované rýchlou delamináciou medzi sklom a fóliou krátko pred stratou kompozitného správania a krehkým zlyhaním (obr. 25).

Bod pri ktorom dochádzalo k delaminácii medzi skrutkou a fóliou je stále nepredvídateľný a výskum by sa mal uskutočniť vo väčšom rozsahu, aby sa stanovil spôsob identifikácie tohto bodu. Treba poznamenať, že podľa výrobcu vzoriek neboli oceľové skrutky nijako ošetrované. Bolo by vhodné prinajmenšom očistiť kontaktnú plochu hlavy skrutky (v kontakte s fóliou) odmasťovaním a uistiť sa, že kontaktná oblasť každej skrutky je rovnaká (bez škrabancov, zárezov atď.). Tieto opatrenia by mali poskytnúť presnejšie hodnoty sily potrebnej na delamináciu spojovacej armatúry [14].



Obr. 25: Rozširovanie delaminácie až do porušenia vzorky [14]

4. Cieľ diplomovej práce

V bežnej stavebnej praxi zatiaľ pre skrutkové spoje nosných konštrukcií zo skla neexistujú komplexné ucelené výpočtové a návrhové postupy. Navrhovanie takýchto spojení je potrebné overiť pomocou experimentov, pretože stále chýbajú teoretické i praktické vedomosti. Inžinieri sú často nútení vychádzať len zo svojich skúseností a návrhové postupy overovať experimentami, ktoré sú časovo náročné a finančne nákladné.

Cieľom tejto práce je určiť základné charakteristiky potrebné pre návrh skrutkových spojov s vloženou hlavou. Toto spojenie je veľmi moderný typ spoja v sklenených konštrukciách, a preto neexistujú žiadne usmernenia alebo predpisy pre jeho návrh.

Práca je rozdelená na dve časti, a to na:

- experimentálna analýza s vyhodnotením nameraných hodnôt počas experimentov
- numerická analýza s parametrickou štúdiou s rôznymi vstupnými parametrami ovplyvňujúce chovanie spoja.

5. Experimentálna analýza

Experimenty boli zamerané na stanovenie únosnosti sklenených tabúľ oslabených skrutkovým spojom s vloženou hlavou. Zisťovala sa sila, pri ktorej dôjde k delaminácií vnútornej vrstvy (fólie) od sklenenej tabuli alebo delaminácií medzi vrstvami fólie, a tak isto aj zaťaženie potrebné na porušenie jednotlivých tabúľ skla alebo popríklad k vytrhnutiu skrutky zo sklenenej tabuli.

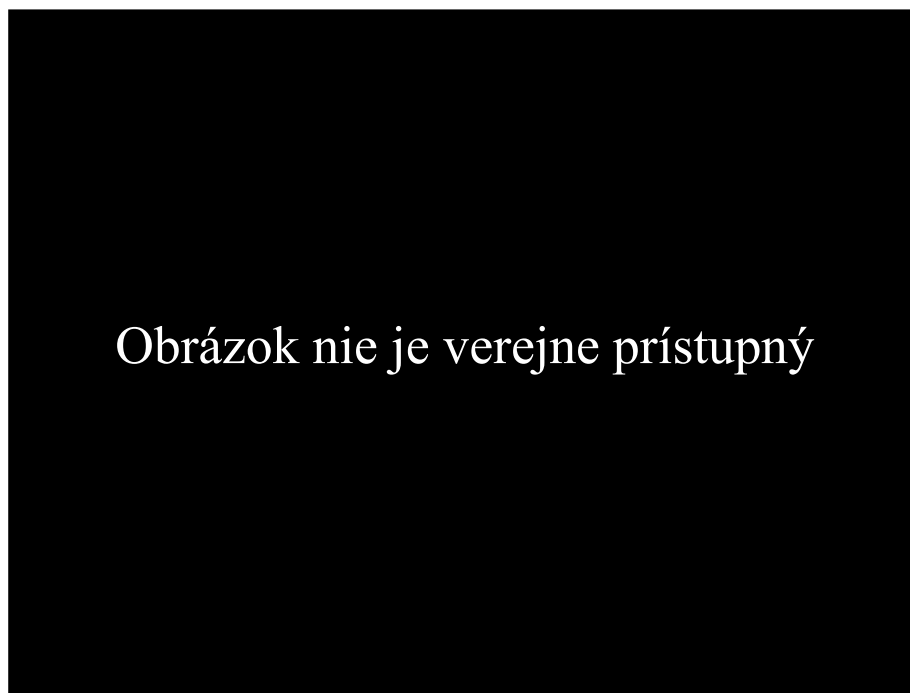
5.1. Popis skúšobných vzoriek

Celkom boli skúšané tri skúšobné telesá so skrutkovým spojom s vloženou hlavou. Skúšky nadväzujú na experimenty uskutočnené v roku 2016 a popísané v [14]. Jednotlivé etapy sa líšia typom použitej fólie pre vrstvené sklo. Skúšané vzorky v tejto práci boli laminované pomocou EVA fólie a boli označené ako F3-01, F3-02 a F3-03 (F3 = fólia 3 (EVA), 01 - 03 = počet vzoriek). Jednu zo vzoriek možno vidieť na obr. 26.



Obr. 26: Vzorka F3-03

Rozmery sklenených tabúl boli pre všetky vzorky rovnaké, a to 500 mm x 300 mm. Každá vzorka pozostáva z 10 mm hrubého plaveného skla, 4 vrstiev EVA fólie (tj. 4 x 0,38 mm) a 10 mm tepelne spevneného skla. V každej vzorke bola v strede vložené hlava oceľovej skrutky s HDPE vložkou (obr. 27). Oceľová skrutka bola zapustená v tepelne spevnenom skle, v kónickom otvore a z druhej strany zaistená nerezovou maticou (obr. 28). Sklo so skrutkou bolo pripevnené k druhému sklu pomocou laminácie.



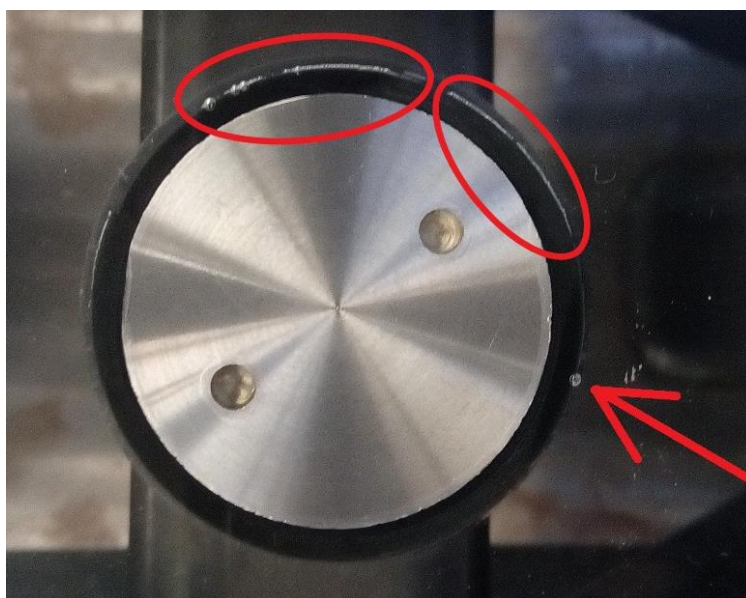
Obr. 27: Zloženie vzorky [14]



Obr. 28: Detail ocelevej skrutky [14]

Vady v spoji

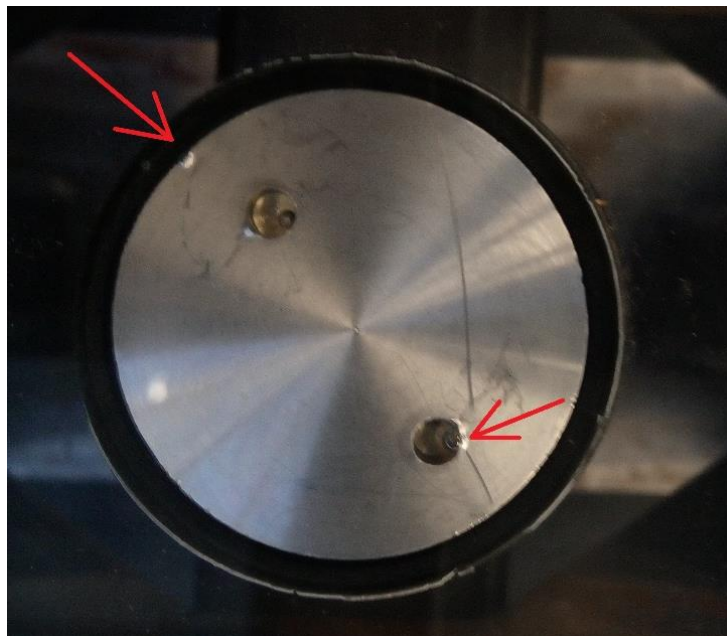
Jednotlivé vzorky obsahovali drobné chyby v oblasti oceleového uchytenia. Prvá vzorka, F3-01, ako možno vidieť na obr. 29, obsahovala dve väčšie bublinky a niekoľko maličkých bubliniek pri okraji HDPE vložky.



Obr. 29: Bublinky na okraji spoja F3-01

Ďalšia vzorka, F3-02, neobsahovala žiadne viditeľné bublinky a ani inakšie chyby.

Posledná vzorka, F3-03, obsahovala bublinku, ktorá nebola pri okraji, ale bola nad dierkou v oceľovom úchyte. Ďalej tam bola malá chyba na obvode oceľového úchyty, kde chýbal kúsok ocele (obr. 30).



Obr. 30: Bublina a chyba uchytenia F3-03

5.2. Popis meracích prístrojov

Na meranie a získavanie údajov potrebných pre vyhodnotenie spoja a vytvorenie numerického modelu boli použité prístroje, ktoré sú znázornené a v stručnosti popísané v nasledujúcich odstavcoch. Údaje, ktoré boli zaznamenávané, sú veľkosť zaťaženia na spoj, priehyb (výchylka) sklenenej tabule a čas.

5.2.1. Skúšobné zariadenie

Na zaťaženie vzoriek bolo použité zariadenie MTS QTest 100 (obr. 31) so softvérom TestWorks 4. Tento model s maximálnym zaťažením 100 kN je vybavený snímačom zaťaženia. MTS QTest slúžil na zaťažovanie / odťažovanie vzoriek.



Obr. 31: Prístroj MTS QTest 100

5.2.2. Laserový extensometer

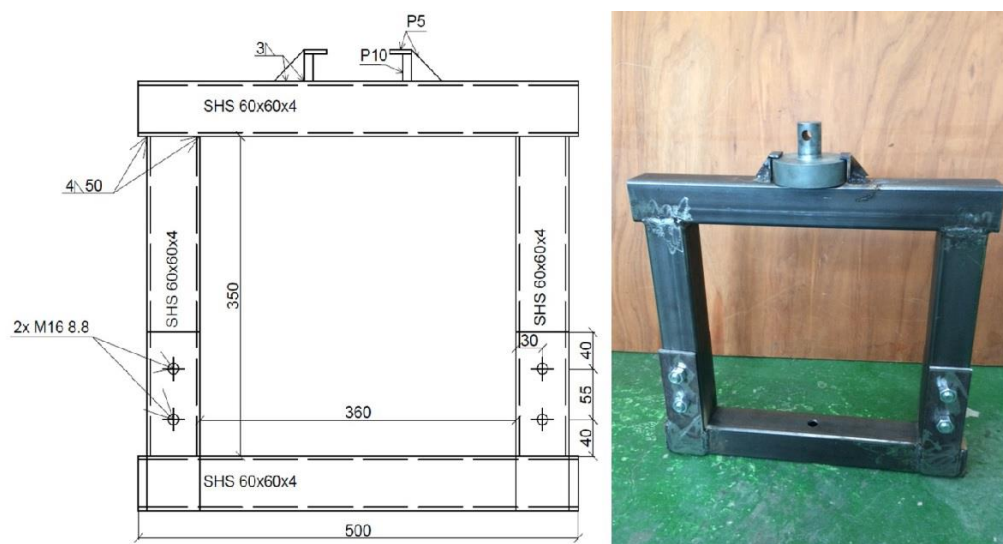
Na meranie priehybu sklenenej tabule bol použitý laserový extensometer (obr. 32). Merala sa vzdialenosť medzi dvoma bodmi, s ktorých jeden bol umiestnený na zaťažovacej stoličici a druhý na spodku skrutky, ktorá bola zaskrutkovaná do spoja sklenenej tabule. Tieto body boli opatrené hliníkovou reflexnou páskou, ktorých vzdialenosť snímal laser.



Obr. 32: Laserový extensometer

5.3. Usporiadanie skúšky

Na zaťaženie musel byť vyrobený špeciálny záťažový rám. Bol zvarovaný zo SHS profilov 60 mm x 60 mm x 4 mm a oceľového plechu o hrúbke 5 mm s odnímateľnou spodnou časťou (obr. 33). Bol navrhnutý tak, aby vydržal zaťaženie až do 50 kN. Tento rám slúžil na prenášanie zaťaženia vyvolaného skúšobným zariadením MTS QTest do vzoriek cez skrutku uchytenu vo vzorkách, ktorá prechádzala otvorom v ráme na spodnej časti.



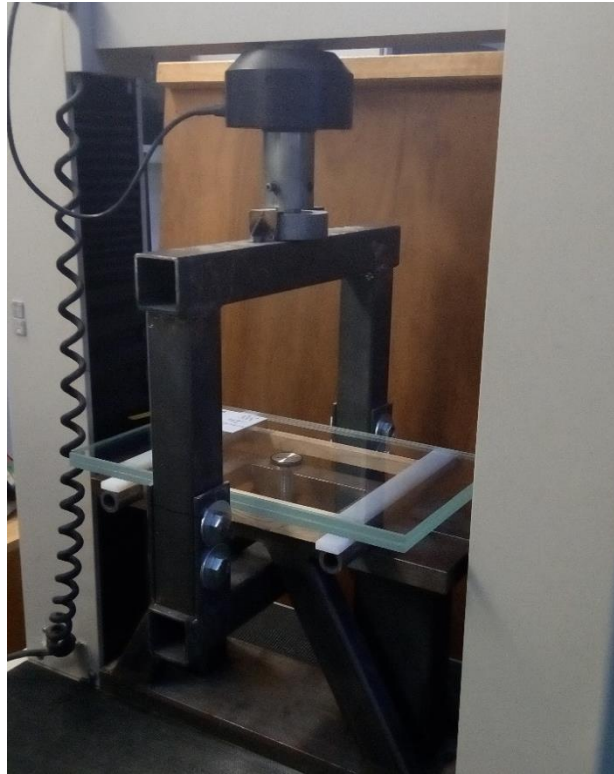
Obr. 33: Zaťažovací rám [14]

Na obr. 34 možno vidieť oceľovú stolicu, na ktorej sú umiestené dve trubky spolu s plastovými podložkami, kde boli uložené vzorky. Stolica slúžila ako podpora pre vzorky, zatiaľ čo plastové podložky slúžili k zmäkčeniu kontaktu medzi stolicou a sklom.



Obr. 34: Oceľová stolica

Jednotlivé vzorky boli umiestené na stoličici na plastových podložkách. Vzorky boli položené tak, že oceľová skrutka smerovala nadol, kde sa pripevnila skrutka skrz oceľový rám (obr. 35).



Obr. 35: Uloženie vzorky

Osová vzdialenosť podpôr (valcová podpora) bola 330 mm. Od okraja boli vzorky umiestnené 85 mm (symetricky), tak aby sa spoj nachádzal presne v strede (obr. 36).



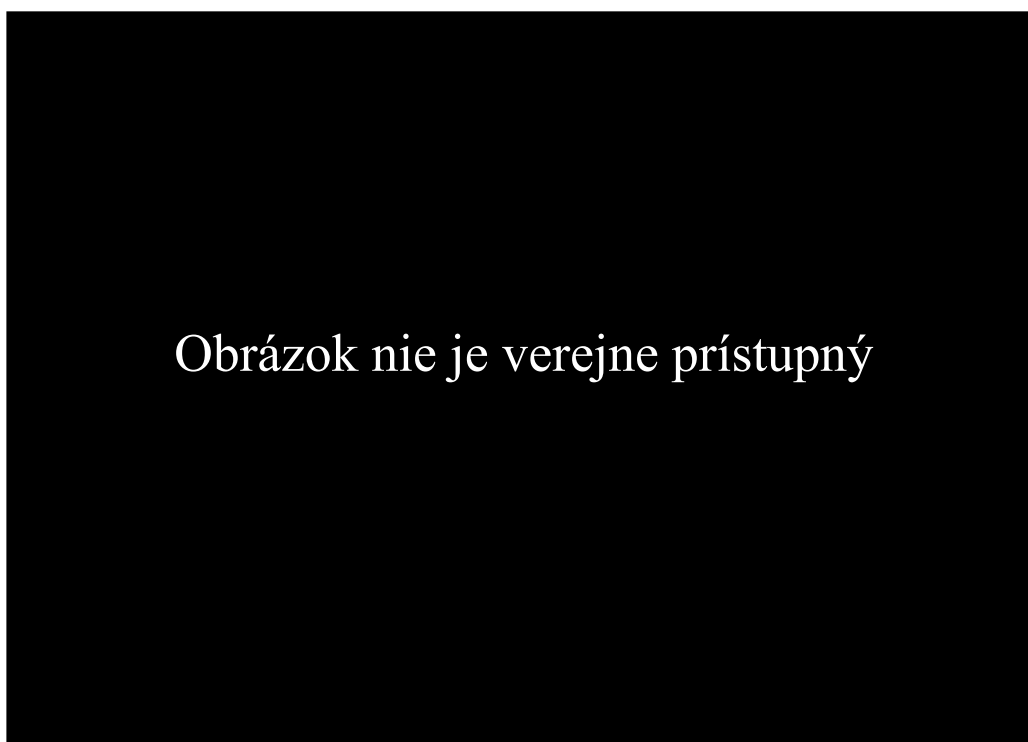
Obr. 36: Schéma experimentu [14]

Rýchlosť, s ktorou boli vzorky zaťažované a aj odtážované bola pre všetky skúšky rovnaká, a to 1 mm/min. Zaťažovanie prebiehalo tak, že vzorky boli priťažované postupne vždy o 1 kN, potom sa čakalo 60 sekúnd a následne boli vzorky odtážené na 0,5 kN, kde sa čakalo 30 s. Takto sa zaťažovalo až do hodnoty 5 kN a od tejto hodnoty sa začalo priťažovať po 0,5 kN pokiaľ sa zaťaženie nedostalo na 10 kN. Po dosiahnutí 10 kN sa začalo znova priťažovať po 1 kN až do porušenia vzorky, ale odtážovanie bolo len na 5 kN. Priebeh skúšky bol rovnaký u všetkých troch vzoriek a prebiehal pri teplote, ktorá bola 20 °C.

5.4. Vyhodnotenie experimentov

5.4.1. Vzorka F3-01

Vzorka bola zaťažovaná postupom uvedeným v kapitole 5.3.. Na obr. 37 je znázornený graf závislosti sily na čase, kde je vidieť priebeh cyklického zaťažovania vzorky. Pri zaťažovaní do hodnoty 10 kN sa na vzorke nič viditeľného nestalo, nenastala žiadna delaminácia fólie. Jediná zmena bola vo veľkosti bubliniek a vytvorení novej veľkej bublinky na okraji oceľového uchytenia, ako je možné vidieť na obr. 38.

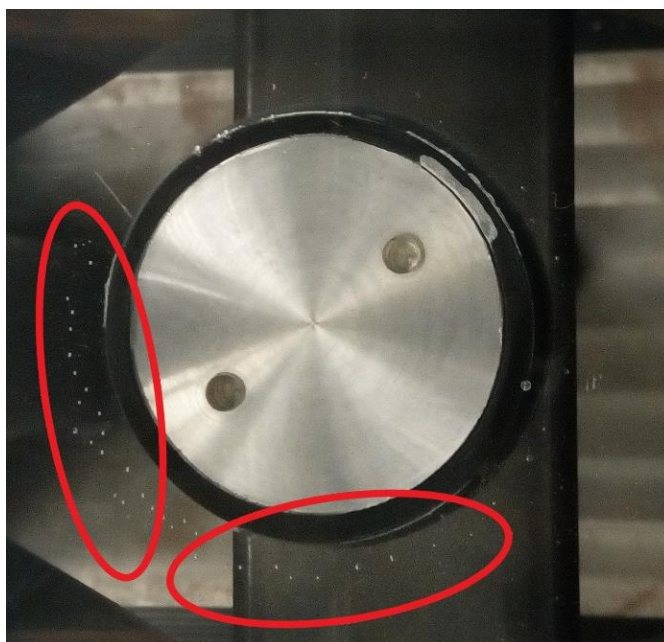


Obr. 37: Graf závislosti sily na čase - vzorka F3-01



Obr. 38: Vznik bubliny

Okolo hodnoty zaťaženia 11 kN sa vytvorilo veľa nových maličkých bubliniek, ale tentokrát neboli na okraji úchyty, ale boli približne 5 mm od neho. So stúpajúcim zaťažením bubliniek pribúdalo (obr. 39).

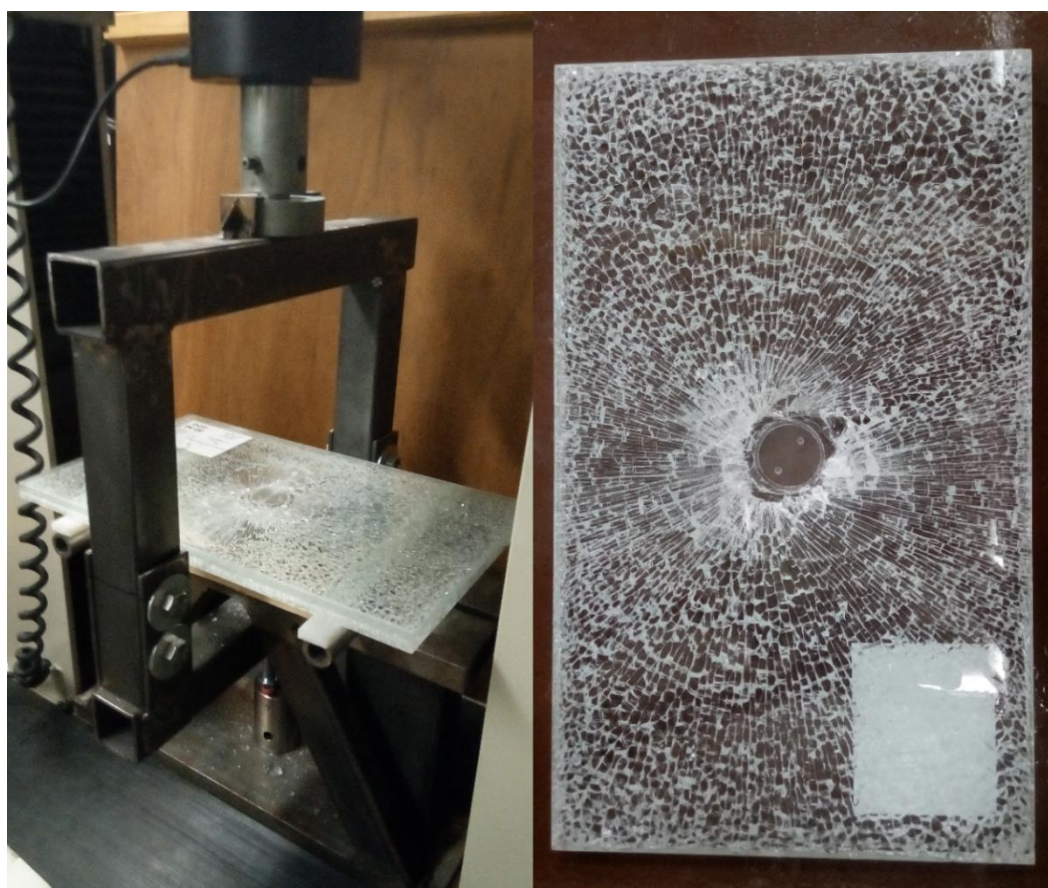


Obr. 39: Rozširovanie bubliniek

Porušenie nastalo pri hodnote XX kN s dosiahnutým priehybom 2,82 mm, kedy sa uchytenie vytrhlo (obr. 40) zo spodnej sklenenej tabule spolu s kúskami skla, ktorá celá popraskala, ako je vidieť na obr. 41. Vrchná tabuľa skla (plavená) zostala neporušená.

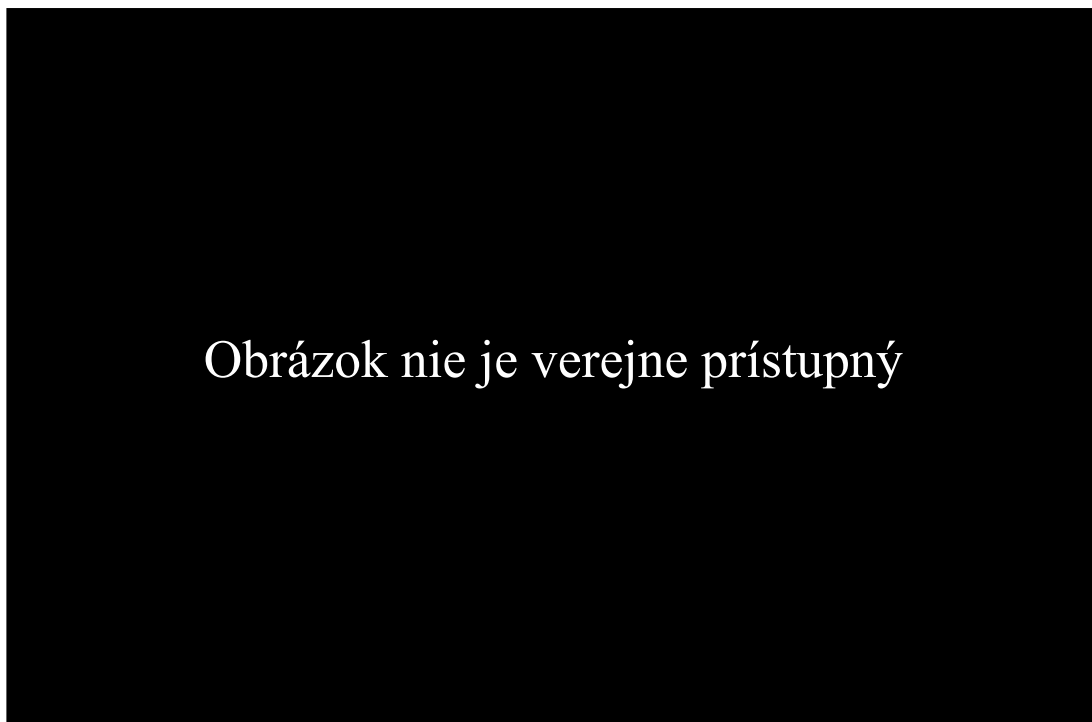


Obr. 40: Vytrhnutý úchyt



Obr. 41: Vzorka F3-01 po porušení

Na nasledujúcom obr. 42 je znázornený graf závislosti sily na priehybe vzorky. Ďalej možno vidieť odťažovacie a priťažovacie dráhy, ktoré sú skoro totožné.

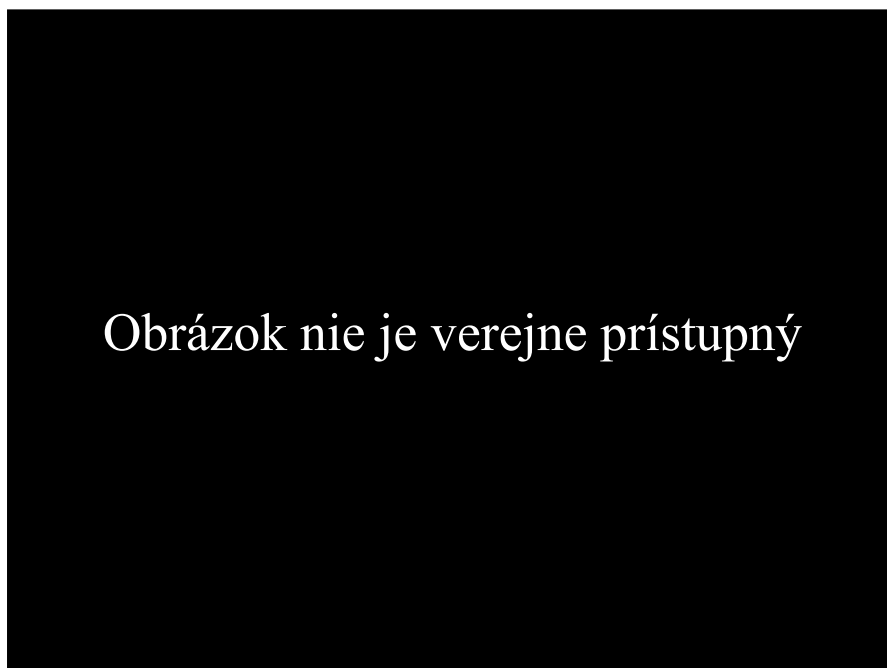


Obr. 42: Graf závislosti sily na priehybe – vzorka F3-01

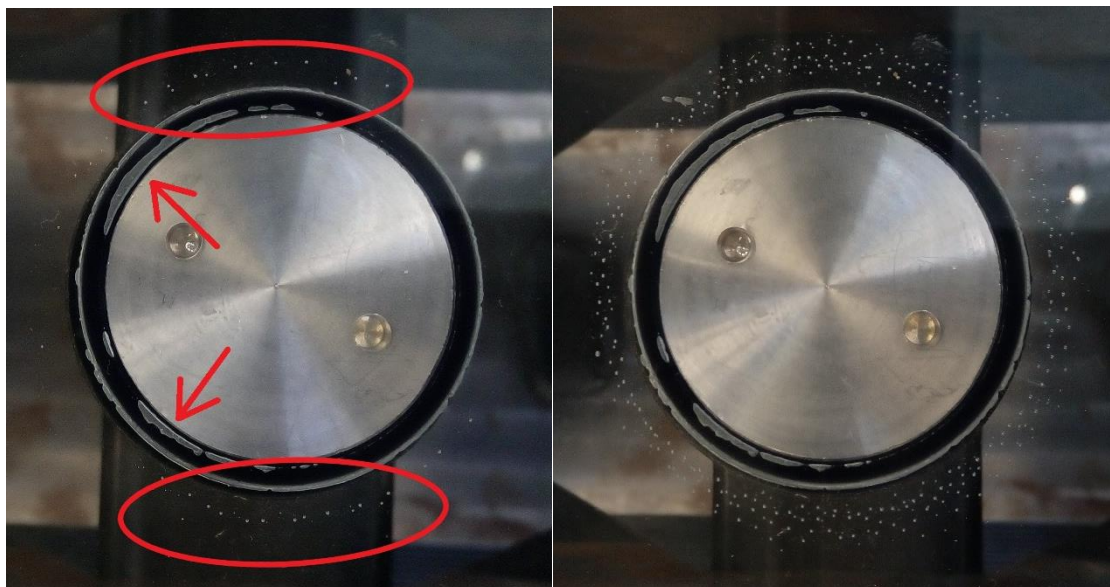
5.4.2. Vzorka F3-02

Druhá vzorka bola skúšaná rovnakým postupom ako prvá, čo je znázornené na obr. 43. Priebeh skúšky bol skoro totožný s prvou skúškou. Na začiatku zaťažovania (okolo 5 kN) sa vytvorili bubliny na okraji úchytu. Potom približne pri zaťažení 10 kN sa takisto, ako na predchádzajúcej vzorke vytvorilo veľa malých bubliniek, asi 5 mm od úchytu (obr. 44). Počet bubliniek so zvyšujúcim zaťažením stúpal až do porušenia, ktoré nastalo pri sile XX kN a priehybe 2,93 mm.

Táto vzorka oproti prvej vzorke (F3-01) vydržala podstatne viacej zaťaženia, pokiaľ sa porušila. Rozdiel týchto hodnôt je o 2,8 kN. Hodnoty priehybu, ktoré dosiahli pri porušení boli skoro totožné.

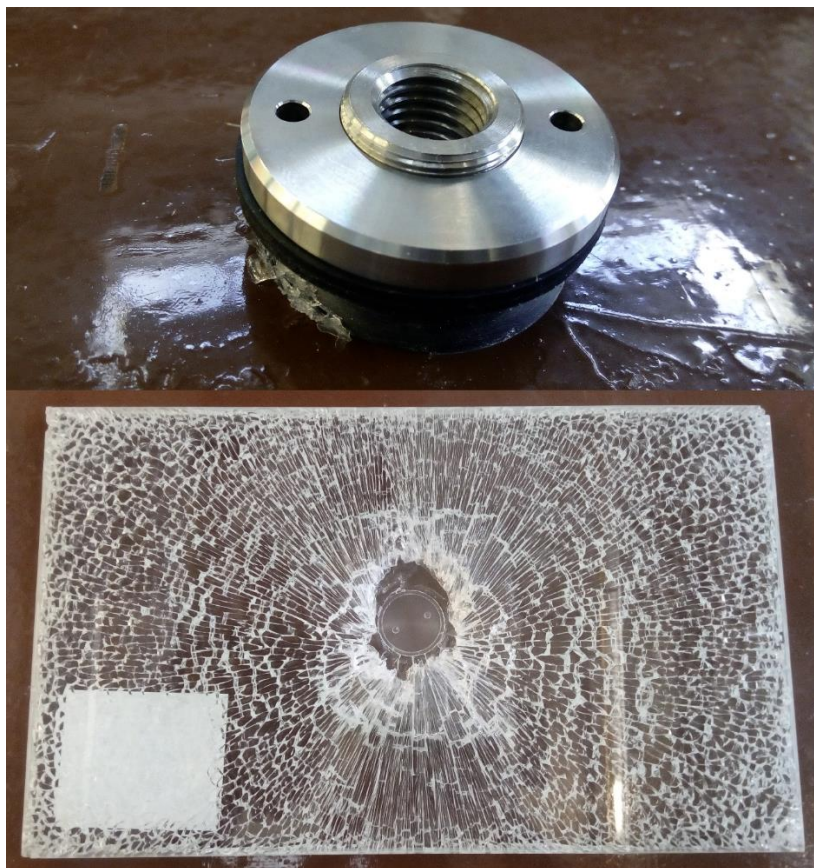


Obr. 43: Graf závislosti sily na čase - vzorka F3-02



Obr. 44: Rozvoj bubliniek – F3-02

Porušenie bolo tiež rovnaké. Oceľový úchyt sa celý vytrhol zo sklenenej tabule, ktorá popraskala a vrchná tabuľa zostala znovu nepoškodená (obr. 45). Graf závislosti sily na priehybe je znázornený na obr. 46.



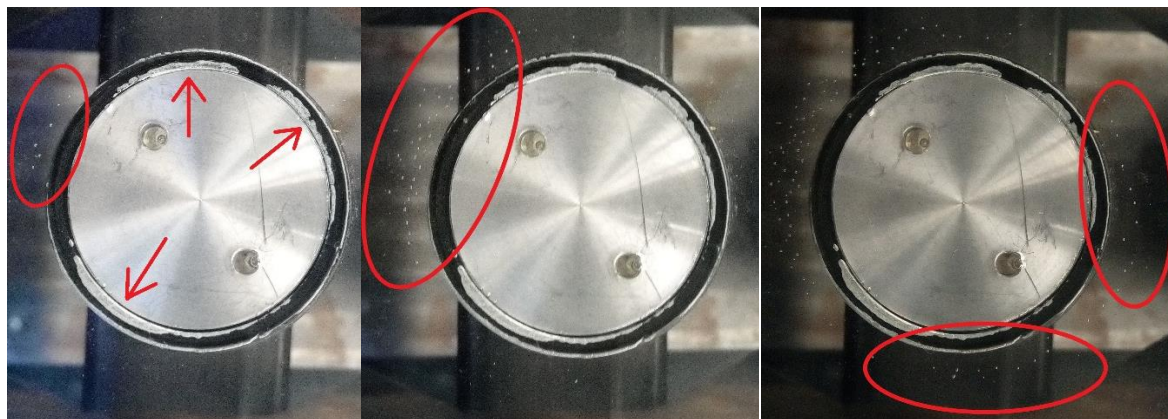
Obr. 45: Vytrhnutý úchyt (hore) a poškodená vzorka F3-02 (dole)

Obrázok nie je verejne prístupný

Obr. 46: Graf závislosti sily na priehybe - vzorka F3-02

5.4.3. Vzorka F3-03

Posledná vzorka bola takisto skúšaná, ako predchádzajúce vzorky. So zvyšujúcim zaťažením sa po okraji úchytu vytvárali a zväčšovali bubliny. Okolo hodnoty 10 kN sa znova vytvorili prvé bublinky, približne 5 mm od úchytu a postupne sa začali vytvárať ďalšie po celom obvode úchytu, čo je možné vidieť na obr. 47.



Obr. 47: Rozvoj bubliniek – F3-03

Obrázok nie je verejne prístupný

Obr. 48: Graf závislosti sily na čase – vzorka F3-03

Zaťažovanie pokračovalo až do porušenia vzorky, ktoré nastalo pri hodnote XX kN a priehyb dosiahol hodnoty 3,12 mm, obr. 48. Porušenie bolo presne totožné s prvými dvoma skúškami, úchyt sa vytrhol z tabule, ktorá popraskala a druhá vrchná tabuľa zostala nepoškodená. Celkový priebeh zaťažovania je vidieť na obr. 49.



Obrázok nie je verejne prístupný

Obr. 49: Graf závislosti sily na priehybe - vzorka F3-03

5.4.4. Porovnanie výsledkov

K jednotlivým vzorkám bola stanovená tuhosť, ktorá bola spočítaná ako priemerná hodnota s troch zaťažovacích a odťažovacích vetiev. Tuhosti vzoriek sú znázornené v grafe na obr. 50.



Obrázok nie je verejne prístupný

Obr. 50: Tuhosť – graf sily na priehybe

Najdôležitejšie údaje zistené z experimentov sú v tab. 2. Priemerná tuhosť všetkých troch vzoriek bola XX kN/mm.

Tab. 2: Namerané hodnoty z experimentov

| | Sila pri porušení [kN] | Priehyb pri porušení [mm] | Tuhosť [kN/mm] |
|-------|---------------------------|------------------------------|-------------------|
| F3-01 | XX | 2,82 | XX |
| F3-02 | XX | 2,93 | XX |
| F3-03 | XX | 3,12 | XX |

6. Numerická analýza

Nasledujúcim krokom bolo vytvoriť výpočtový model pomocou metódy konečných prvkov (MKP) a následne ho verifikovať podľa uskutočnených experimentov. Po dosiahnutí zhody medzi experimentami a výpočtovým modelom bola spravená parametrická štúdia pre vybraný parameter ovplyvňujúci chovanie spoja.

Pre numerické modelovanie bol použitý program ANSYS Workbench 17.2, pretože je pre vedecké a študijné účely na ČVUT voľne prístupný.

6.1. Numerický model

V programe ANSYS bol vytvorený trojrozmerný numerický model sklenených vzoriek, ktorý mal potvrdiť a overiť výsledky získané z experimentov. Hlavným cieľom bolo dosiahnuť totožné správanie experimentov a numerického modelu.

6.1.1. Vlastnosti materiálov

Jednotlivé vlastnosti materiálov, ktoré boli použité pri experimentoch a numerickej analýze sú popísané v nasledujúcich tabuľkách (tab. 3, 4, 5, 6). Hodnoty základných vlastností materiálov boli prevzaté z odborných literatúr.

Nerezová oceľ [15]

Tab. 3: Materiálové vlastnosti nerezovej ocele

| | Hodnoty | Jednotky |
|-----------------------------|---------|----------------------|
| Hustota ρ | 7 750 | [kg/m ³] |
| Youngov modul E | 193 000 | [MPa] |
| Poissonovo číslo ν | 0,31 | [-] |
| Modul pružnosti v šmyku G | 73 664 | [MPa] |

HDPE – polyetylén s vysokou hustotou [16]

Tab. 4: Materiálové vlastnosti HDPE

| | Hodnoty | Jednotky |
|-----------------------------|---------|----------------------|
| Hustota ρ | 950 | [kg/m ³] |
| Youngov modul E | 1 100 | [MPa] |
| Poissonovo číslo ν | 0,42 | [-] |
| Modul pružnosti v šmyku G | 387 | [MPa] |

Sklo [9]

Tab. 5: Materiálové vlastnosti skla

| | Hodnoty | Jednotky |
|-----------------------------|---------|----------------------|
| Hustota ρ | 2 500 | [kg/m ³] |
| Youngov modul E | 73 000 | [MPa] |
| Poissonovo číslo ν | 0,23 | [-] |
| Modul pružnosti v šmyku G | 30 048 | [MPa] |
| Plavené sklo f_t | 40 | [MPa] |
| Tepelne upravené sklo f_t | 80 | [MPa] |

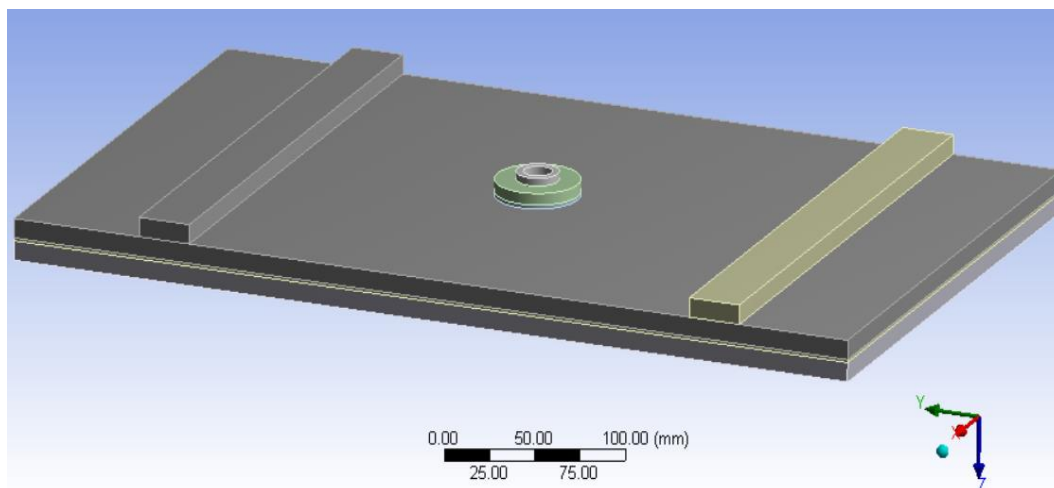
EVA fólia [16]

Tab. 6: Materiálové vlastnosti EVA fólie

| | Hodnoty | Jednotky |
|-----------------------------|---------|----------|
| Youngov modul E | 1 550 | [MPa] |
| Poissonovo číslo ν | 0,48 | [-] |
| Modul pružnosti v šmyku G | 518 | [MPa] |
| Sila f_t | 34,5 | [MPa] |

6.1.2. Geometria modelu

Numerický model bol zložený z jednotlivých častí, ako skúšané vzorky, ktoré boli spojené pomocou kontaktov do jedného celku, vid' obr. 51 a obr. 52. Tieto časti boli: dve sklenené tabule, fólia, oceľová skrutka (úchyt) s maticou, dva kusy vložiek z HDPE (prvá v skle, druhá pod maticou) a dve podpory. Každéj časti boli priradené vlastnosti materiálov, ktoré sú popísané v predchádzajúcej kapitole.



Obr. 51: Numerický model

Obrázok nie je verejne prístupný

Obr. 52: Rez modelom cez spoj

Kontakty a sieť

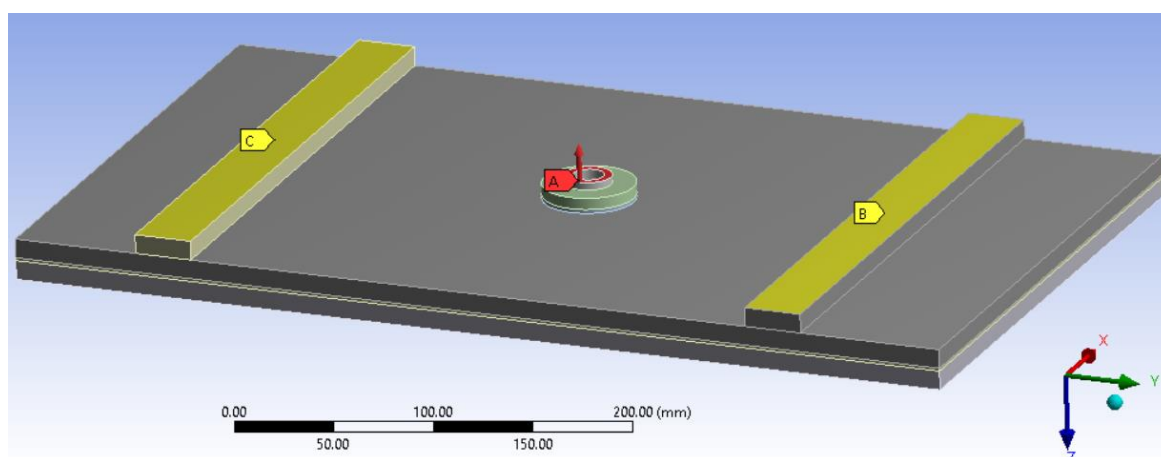
Medzi všetkými namodelovanými časťami boli vložené kontakty. Lepené kontakty boli vložené medzi sklo a fóliu, oceľovú skrutku a fóliu a takisto medzi jednu podporu a sklo (aby sa zabránilo vodorovnému posunu modelu). Ostatné kontakty dovoľovali separáciu medzi sebou. Ďalším krokom bolo vytvorenie siete.

Podoprenie

Podoprenie bolo pomocou podpôr, ktoré mali dovolené len otáčanie okolo vlastnej osy a ostatné otáčania, a všetky posuny boli zakázané, vid' obr. 53.

Zaťaženie

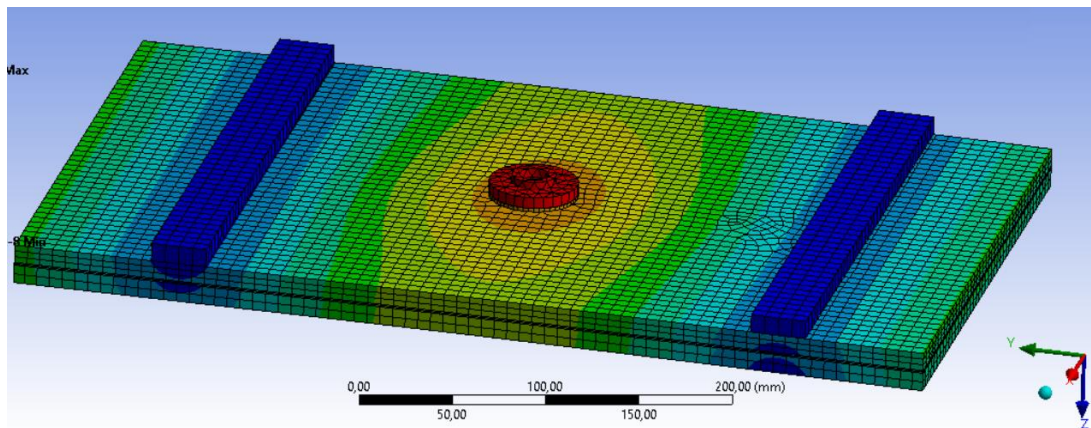
Zaťaženie bolo aplikované na model ako sila, ktorá bola umiestnená na vyčnievajúcej strane skrutky, vid' obr. 53. Nanesená sila mala hodnotu 7,00 kN.



Obr. 53: Umiestnenie podpôr (žltá farba) a sily (červená farba)

6.2. Vyhodnotenie modelu

Numerický model pri hodnote zaťaženia 7 kN vykazoval priehyb XX mm, ako je vidieť na obr. 54, a teda mal celkovú tuhosť $k_{\text{mod}} = \text{XX}$ kN/mm. Tuhosť numerického modelu ($k_{\text{mod}} = \text{XX}$ kN/mm) odpovedá tuhosti stanovenej z experimentov ($k_{\text{exp}} = \text{XX}$ kN/mm). Porovnanie tuhostí získaných z numerického modelu a z experimentov, je možné vidieť na grafe (obr. 55). Z hodnôt tuhostí k_{mod} a k_{exp} vyplýva, že numerický model sklenenej vzorky s vloženou skrutkou sa chová totožne s experimentami a bol správne namodelovaný.



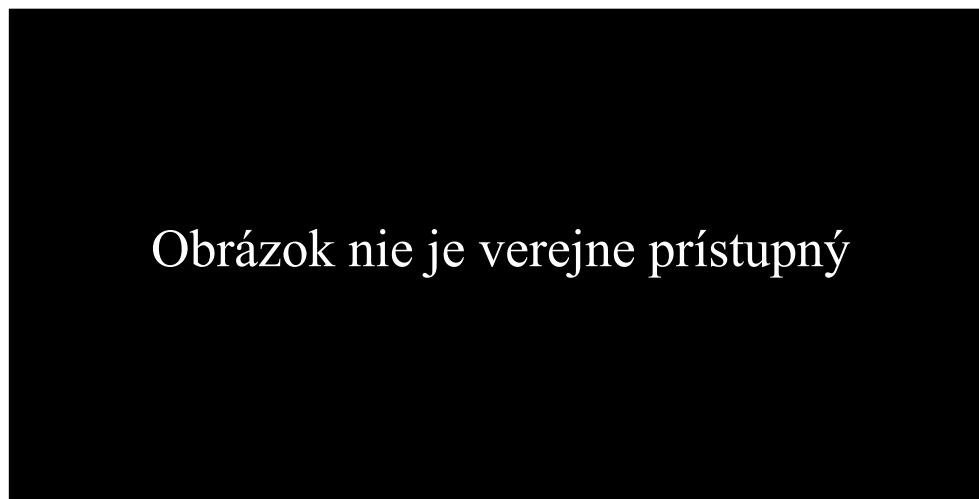
Obrázok nie je verejne prístupný

Obr. 54: Deformácia modelu pohľad (hore) a rez (dole)

Obrázok nie je verejne prístupný

Obr. 55: Porovnanie tuhostí experimentov a numerického modelu

Ďalej bolo zistené ťahové napätie pri dosiahnutí únosností podľa uskutočnených experimentov. Maximálne ťahové napätie sa vyskytovalo v sklenenej tabuli okolo vloženej hlavy skrutky, vid' obr. 56. Zistené napätia sú vypísané v tab. 7. Priemerné maximálne ťahové napätie bolo XX MPa.



Obr. 56: Rozloženie napätia po vzorke - rez

Tab. 7: Ťahové napätia

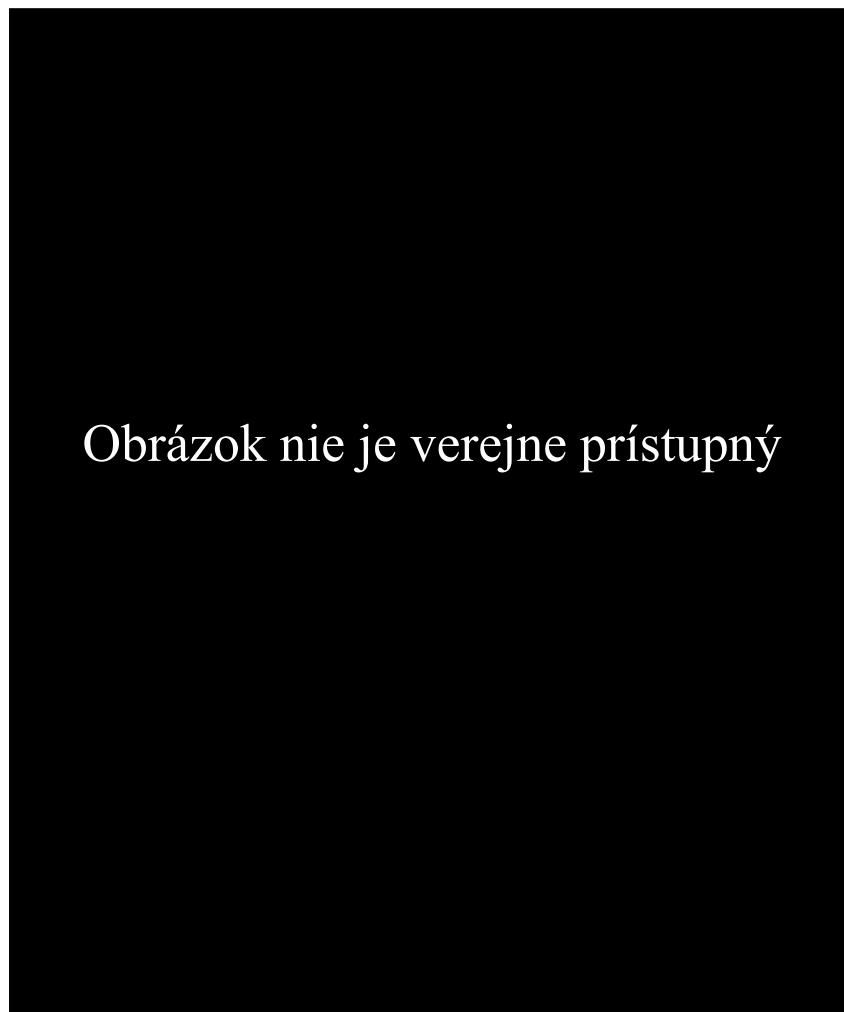
| | Vzorka F3-01 | Vzorka F3-02 | Vzorka F3-03 |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Sila pri porušení [kN] | XX | XX | XX |
| Napätie pri porušení [MPa] | XX | XX | XX |

6.3. Parametrická štúdia

V tejto časti práce je popísaný numerický model s rôznymi priermi vloženej hlavy skrutky použitý v parametrickej štúdii. Numerický model vychádzal už z odskúšaného numerického modelu, ktorý je popísaný v predchádzajúcich kapitolách.

6.3.1. Vstupné parametre

Parameter, ktorý bol použitý v parametrickej štúdii, bol vybraný priemer vloženej hlavy skrutky, ktorý mal veľkosť od 30 mm do 70 mm (po 10 mm). Vo vodorovnom smere boli menené priemery hlavy a ostatné vodorovné rozmery boli zväčšené alebo zmenšené v závislosti na priemere hlavy. Rozmery skrutky v zvislom smere (napr. výška hlavy) neboli zmenené, zostali pôvodné. Použité rozmery sú zobrazené a popísané na obr. 57.



Obr. 57: Použité rozmery skrutky [14]

6.3.2. Záver

Veľkosť priemeru hlavy skrutky použitej pri experimentoch bola XX mm. Pri priemere XX mm bola tuhosť modelu o 11,9 % väčšia, ale ďalej so zväčšujúcim sa priemerom stúpala tuhosť pomalšie. Naopak pri menšom priemere (XX mm) mal model nižšiu tuhosť o 9 %. V tab. 8 sú popísané jednotlivé tuhosti počítaných priemerov skrutiek a na obr. 58 a obr. 59 sú znázornené grafy s jednotlivými tuhosťami.

Tab. 8: Tuhosti skrutiek

| | ø 30 mm | ø 40 mm | ø 50 mm | ø 60 mm | ø 70 mm |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Tuhosť [kN/mm] | XX | XX | XX | XX | XX |



Obrázok nie je verejne prístupný

Obr. 58: Graf závislosti sily na priehybe



Obrázok nie je verejne prístupný

Obr. 59: Porovnanie tuhostí s rôznymi priemerami hlavy skrutky

Pomocou zisteného ťahového napätia v numerickom modeli pri porušení sklenenej tabuli boli k všetkým priemerom skrutiek stanovené únosnosti. Na obr. 60 je znázornený graf s únosnosťami sklenených tabúl pre použité priemery skrutiek.



Obrázok nie je verejne prístupný

Obr. 60: Graf únosnosti sklenených tabúl v závislosti na priemere skrutky

So zväčšujúcim sa priemerom stúpala únosnosť spoja. Podľa grafu na obr. 60 je vidieť lineárnu závislosť únosnosti na priemere skrutky. Toto chovanie numerických modelov platí pri porušení, aké nastalo pri experimentoch, tj. zlyhala sklenená tabuľa s vloženou skrutkou. Ideálny priemer na skrutku podľa získaných údajov je medzi XX až XX mm, pretože pri väčšom priemere klesá tuhosť vzorky, spoj je väčší a tým menej estetickjší a drahší na materiál a výrobu otvoru. Pri použití priemeru menšom ako XX mm je nízka únosnosť spoja.

7. Výsledky diplomovej práce

V prvej časti práce boli uskutočnené experimenty pre stanovenie vlastností vloženej hlavy skrutky vo vrstvenom skle. Sklenené vzorky boli laminované pomocou fólie EVA. Spoj vo vzorkách bol zaťažovaný ťahom. Kolaps vzoriek bol náhly, bez predchádzajúceho varovania vytrhnutím skrutky zo sklenenej tabule, ktorá sa porušila. Vytrhnutie skrutky nastalo pri dosiahnutí ťahového napätia skla okolo skrutky. Výsledkom experimentálnej práce sú grafy únosností, zaťažovania a tuhostí. Vlastnosti zistené z experimentov boli priemerná sila, kedy nastalo porušenie, priehyby dosiahnuté pred porušením a taktiež bola spočítaná tuhosť, napätie a únosnosť vzoriek. Jednotlivé grafy a hodnoty vlastností sú zobrazené a popísané v predchádzajúcich kapitolách.

Po namodelovaní numerického modelu pomocou výsledkov získaných pri experimentoch a po jeho verifikácii s experimentami bola ukázaná dobrá zhoda medzi experimentom a modelom v tuhosti a deformácii. Pomocou modelu bolo zistené ťahové napätie skla okolo otvoru pre skrutku pri maximálnom zaťažení.

Numerický model bol použitý k vypracovaniu parametrickej štúdií. Cieľom štúdie je zistiť chovanie sklenených panelov s rôznymi priemerami vložených skrutiek. Bolo zistené, že so zväčšujúcim priemerom sa zväčšovala tuhosť. Naopak pri menšom priemere bola tuhosť menšia. Pomocou ťahového napätia pri porušení bola zistená únosnosť sklenených tabúl pre rôzne priemery, ktorá bola lineárna pri rovnakom spôsobe porušenia ako pri experimentoch, t.j. porušenie sklenenej tabule a vytrhnutí skrutky.

Vzorky použité pri tejto práci boli laminované EVA fóliou, zatiaľ čo v práci [14] boli laminované pomocou fólie SentryGlass. Rozmery sklenených tabúl a skrutiek boli identické v oboch prácach, ako aj materiál použitý na sklo, podložky a skrutkový spoj, pretože boli vyrobené od toho istého výrobcu. Jediným rozdielom bol druh použitej fólie na lamináciu.

Uskutočnené experimenty ukázali rozdiely v chovaní pri použití rôznych fólií. Skúšané vzorky v tejto práci s EVA fóliou nevykázali žiadnu delamináciu, či už medzi fóliou a sklom, fóliou a fóliou alebo fóliou a hlavou skrutky. Až do porušenia, ktoré nastalo náhle, nevykazovali vzorky žiadne poruchy, okrem vytvorenia maličkých bubliniek okolo spoja. Zatiaľ čo pri fólii SentryGlass [14] pri zaťažení okolo 6 kN nastala delaminácia fólie od skrutky a s ňou nárast priehybu. Tesne pred porušením nastala delaminácia fólie od skla, čo

viedlo k zlyhaniu vzorky. Pri porovnaní tuhostí mala EVA fólia skoro polovičnú tuhosť oproti fólii SentryGlass. Základné rozdiely medzi vzorkami sú zhrnuté v tab. 9.

Tab. 9: Zhrnutie vlastností sklenených vzoriek s rozdielou fóliou

| | Únosnosť [kN] | Tuhosť [kN/mm] | Delaminácia |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| EVA fólia | XX | XX | nenastala |
| SentryGlass fólia | XX | XX | nastala pri 6 kN |

Z hľadiska bezpečnosti je použitie EVA fólie menej bezpečnejšie, oproti použitiu SentryGlass fólie, pretože pri zväčšenom zaťažení sú vidieť známky porušenia fólie delamináciou, čo môže varovať ľudí pred kolapsom. Pri EVA fólii nenastala žiadna delaminácia, ktorá by varovala pred kolapsom, ktorý bol náhli.

8. Témy na ďalší výskum

Uskutočnené experimenty so spojom s vloženou hlavou skrutky ukázali veľký vplyv druhu fólie a priemeru skrutky na vlastnosti. K spoľahlivému návrhu by bolo potrebné uskutočniť ďalšie skúšky. Ďalší výskum v tejto oblasti by bolo dobré zamerať na získanie chovania inakších typov fólií použitých ako medzivrstvu a na základe toho určiť vhodné fólie. Určiť chovanie a hodnoty vzoriek pri zaťažovaní na spoj tlakom, strihom a strihom s excentricitou a nájsť ideálny tvar vlozenej skrutky (priemer, uhol skosenia). Uskutočnenie ďalších parametrických štúdií s použitím vstupných parametrov, a to zmena hrúbky skla a zmena uhlu skosenia hlavy skrutky.

Literatúra

1. ELIÁŠOVÁ, M. *Nosné konstrukce ze skla*, seminář katedry ocelových a dřevěných konstrukcí, Praha, str. 27-34, 2005, ISBN 80-01-03279-5.
2. ELIÁŠOVÁ, M.; WALD, F.; SOKOL, Z. *Šroubované přípoje konstrukcí ze skla*, sborník 20. česko-slovenské konference s mezinárodní účastí, Ocelové konstrukce a mosty, 2003, strany 101-106, Praha, 2003, ISBN 80-01-02747-3.
3. WURM, J. *Glass structures: design and construction of self-supporting skins*. Basel: Birkhäuser, 2007, ISBN 978-3-7643-7608-6.
4. LAUFS, W.; LUIBLE, A. *Introduction on Use of Glass in Modern Buildings*, EPFL-ICOM, Lausanne, 2003, ISBN 80-01-02849-6.
5. KREWINKEL, H.W. *Glass Buildings, Material, Structure and Detail*, Birkhauser, Basel, 1998, ISBN 3-7643-5650-2.
6. RYAN, P.; OTLET, M.; OGDEN, R.G. *Steel supported glazing systems: interfaces*. Ascot, Berkshire: Steel Construction Institute, 1997, ISBN 1-85942-070-2.
7. FELDMANN, M.; KASPER, R. *Guidance for European Structural Design of Glass Components*, Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. Luxembourg, 2014, ISBN 978-92-79-35094-8.
8. *The Institution of Structural Engineers*, Structural Use of Glass in Buildings, London, 1999, ISBN 1-874266514.
9. HALDIMANN, M.; LUIBLE, A.; OVEREND, M. *Structural use of glass*. Zürich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2008, ISBN 978-3-85748-119-2.
10. FLORIÁN, M. *Inteligentní skleněné fasády*, 1. vydání, ČVUT Praha, 2005, ISBN 80-01-03195-0.
11. CARVALHO, P.L.L.; CRUZ, P.J.S.; SILVA, E.; CASAL, C. *Embedded glass fixing system*, In Jens Schneider & Bernhard Weller (eds.), *Engineered Transparency; Proc. intern. symp*, Düsseldorf, Germany, 29-30 September 2010, 213-220.
12. VYZANTIADOU, M.A.; AVDELAS, A.V. Point fixed glazing systems: technological and morphological aspects. *Journal of Constructional Steel Research*. 2004, **60**(8), 1227-1240.
13. *Challenging glass 4 & COST action TU0905 final conference: proceedings of the challenging glass 4 & cost action TU0905 final conference, ecole polytechnique*

fédérale de lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland, 6-7 February 2014. Boca Raton: CRC Press, ISBN 978-1-138-00164-0.

14. LORENZ, J. *Numerical analysis of glass pane: a blind point connection*, Praha, Česká Republika, 2016. České vysoké učení technické.
15. *Steel material properties*. SteelConstruction [online]. [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: https://www.steelconstruction.info/Steel_material_properties.
16. *MatWeb*, Material property data [online]. [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: <http://www.matweb.com>.