



У Н И В Е Р З И Т Е Т
“СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ” - СКОПЈЕ



МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ - СКОПЈЕ

м-р БОЈАНА ТРАЈАНОВСКА, дипл.маш.инж

**ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА МЕХАНИЧКИТЕ КАРАКТЕРИСТИКИ НА
КОНСТРУКТИВНИ ХИБРИДНИ ПЛОЧЕСТИ ЕЛЕМЕНТИ ОД ЧЕЛИК И
СТАКЛО**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

СКОПЈЕ, 2015

Ментор: Вон. Проф. д-р. Виктор Гаврилоски
Машински Факултет - Скопје

Членови на комисијата: Вон. Проф. д-р. Виктор Гаврилоски
Машински Факултет – Скопје

Проф. д-р. Зоран Богатиноски
Машински Факултет - Скопје

Проф. д-р. Димитри Козинаков
Машински Факултет - Скопје

Проф. д-р. Петар Цветановски
Градежен Факултет - Скопје

Проф. д-р. Стојанче Нусев
Технички факултет – Битола

Датум на одбрана: 20.Авг.2015

ТЕХНИЧКИ НАУКИ - МАШИНСТВО

СОДРЖИНА

ABSTRACT	i
АПСТРАКТ	ii
ПРЕДГОВОР	iii
НОМЕНКЛАТУРА.....	v
1. Вовед.....	1
1.1. Мотивација за истражувањето.....	2
1.2. Преглед на постоечка литература	5
1.3. Цели, хипотези и методологија на истражувањето.....	11
1.4. Придобивки од истражувањето	13
1.5. Организација на дисертацијата.....	15
2. Примена на стаклото како конструктивен материјал.....	19
2.1. Стаклото во архитектонските конструкции	20
2.2. Технологија на производство и видови на стакло	24
2.3. Механички карактеристики на стаклото	30
2.3.1. Статистичка распределба на грешки.....	32
2.3.2. Експериментално определување на јакосните карактеристики	38
2.4. Раздвоиви врски кај конструктивните елементи од стакло	41
2.5. Влијание на отворите врз концентрацијата на напоните	46
3. Хибридни структури со стакло	49
3.1. Гредни елементи од стакло	50
3.2. Плочести структури.....	57
3.3. Зголемување на капацитетот на преостаната носивост	64
4. Плочести елементи зајакнати со челичен чим.....	69
4.1. Концепт на зајакнат плочест елемент	70
4.2. Врски изведени со лепење.....	71
4.2.1. Механичко однесување на врските со лепење.....	72
4.2.2. Параметри кои влијаат на перформансите на врските со лепење	75
4.3. Определување на обликот и формата на перфорацијата со помош на параметарско моделирање.....	77

5. Аналитичко определување на напонско-деформационата состојба со примена на методот на конечни елементи	86
5.1. Основни равенки на линеарната теорија на еластичност	87
5.2. Рамнинска напонско-деформациона состојба.....	93
5.3. Теорија на свиткување на плочи.....	99
5.3.1. Основни равенства од теорија на свиткување на плочи	99
5.3.2. Теорија на свиткување на плочи со големи деформации.....	102
5.3.3. Плочи со ламинирана структура	106
5.4. Просторна напонско-деформациона состојба	108
5.5. Проблеми при анализа на свиткување со конечни елементи	117
6. Експериментални истражувања	121
6.1. Експериментална програма.....	122
6.1.1. Испитни модели.....	122
6.1.2. Методологија на испитување	128
6.2. Резултати од експерименталното испитување	133
6.2.1. Дијаграми сила-поместување.....	133
6.2.2. Напонско-деформациона состојба.....	146
7. Нумеричко моделирање и анализа на напонско-деформационата состојба	154
7.1. Моделирање со МКЕ.....	155
7.2. Анализа на резултати од нумеричко моделирање	158
7.3. Споредбена анализа на резултатите од истражувањето.....	167
8. Заклучоци	176
8.1. Заклучоци врз основа на спроведените истражувања	177
8.2. Препораки за понатамошни испитувања.....	180
Литература	182

ABSTRACT

The trend of using load bearing elements made of structural glass is closely related to the appearance of laminated glass. In the last decade, a lot of research is done in the area of load bearing elements, glass beams and columns. The early research include changes in the design of these elements by reinforcing the structural glass elements with steel profiles, ropes, carbon fiber etc. applying them in the weakest zone of the element, tensile zone. The main goal of applying this reinforcement is improving the mechanical behavior of the glass element by changing its stress state and bearing capacity.

The main disadvantage of using structural glass elements is their actual strength that can differ from the theoretical. Thus, special attention should be put in designing structural glass elements taking in consideration their strength and brittleness.

The proposed and analyzed structural hybrid element made out of glass panel and perforated steel plate is a new and innovative solution which preserves the transparency of the glass but at the same time results in decreasing the stresses in the glass panel and improving its mechanical characteristics. If the perforated element has appropriate plasticity, strength and ductility a residual strength can be obtained for the glass giving it post breakage bearing capacity.

The hybrid steel-glass panels that are part of the research are formed by adhesively connecting two different materials. New composite structure is gained that has different mechanical characteristics compared to its elements apart. In order to ensure practical application for these new concepts of hybrid structures, defining its stress-deformation state and behavior is necessary which in this research is done by numerical modeling and experimental testing of the models.

Key words: hybrid element, structural glass, perforated steel plate, reinforcement, strength, adhesive connections, numerical modeling, finite elements, experimental testing

АПСТРАКТ

Појавата на ламинираното стакло и неговата примена блиску се врзува со новиот тренд на истражувања во областа на конструктивното стакло-носечки елементи од стакло. Во последната деценија интензивно се испитуваат носечки елементи, носачи и столбови направени целосно од стакло. По првите испитувања во оваа област се воведува и нов ефект во дизајнот, а тоа е зајакнување на стаклениот носечки елемент со челични профили, јажиња, карбонски влакна итн., кои функционираат во најслабата област на стаклото, а тоа е областа на затегнувачки напони. Една од целите на ваквото механичко зајакнување е подобрување на механичкото однесување и карактеристики на елементот преку промена на напонската состојба и носивост на елементот од стакло.

Проблемот кој се јавува кај употребата на стаклените елементи како конструктивни е нивната специфична јакосна состојба. Кртоста и ниската затегачка јакост се основните особини на стаклото поради кои при изработката на елементи од стакло потребно е посебно внимание за дизајнот и тестирањето.

Хибридниот конструктивен елемент од стаклен панел и челична плоча со отвори, изработен и анализиран во оваа теза, претставува едно ново, иновативно решение кое истовремено ја задржува транспарентноста, а обезбедува јакосна состојба на намалени напони во стаклениот панел и зголемени механички карактеристики. Доколку перфорирањето се изврши на материјал кој има соодветна пластичност, јакост и дуктилност се добива можност за обезбедување на капацитет на преостаната носивост и по појава на лом на стаклениот елемент.

Хибридните панели од челик и стакло кои се предмет на ова истражување се формираат со спојување со лепење на овие два нееднородни материјали. Со тоа ќе се создаде нова композитна структура која ќе има различни механички карактеристики од механичките карактеристики на секоја компонента поодделно. За ваквите панели да имаат практична употреба потребно е прецизно определување на напонско-деформационата состојба што во истражувањето детално се испитува преку нумерички модели верифицирани со експериментални истражувања.

Клучни зборови: хибриден елемент, стакло, перфорирана челична плоча, зајакнување, јакосни особини, врски со лепење, нумерчко моделирање, конечни елементи, експериментални испитувања

ПРЕДГОВОР

Во годините кои му претстоеа на истражувањето од оваа докторска дисертација постоеа многу предизвици и вложена енергија. Најголем предизвик претставуваше изборот на темата за дисертацијата, кој сам по себе актуелен, беше доволен мотив за напорно работење во кое беа вклучени многу луѓе на кои сум им бескрајно благодарна.

На почетокот сакам да се заблагодарам на менторот, вон. Проф д-р Виктор Гаврилоски кој истрајно и активно учествуваше во секој чекор од истражувањата и изработката на дисертацијата.

Не помалку присутни и вклучени беа моите предметни професори, проф. д-р Зоран Богатиноски и проф. д-р Марјан Гаврилоски кои несебично одвојуваа време за консултации и поддршка во текот на работењето за што посебно ги почитувам и им се заблагодарувам.

Секако благодарност и до останатите членови на Институтот за заварување и заварени конструкции кои покажаа разбирање за потребното време за изработка на дисертацијата и ми излегоа во пресрет со моите обврски како асистент на Институтот.

До комисијата за одбрана, во која покрај проф. д-р Димитри Козинаков со кој соработуваме секојдневно, беа проф. д-р Петар Цветановски и проф. д-р Стојанче Нусев како надворешни членови, големо заблагодарам за укажаната чест.

Посебна благодарност сакам да упатам кон сопственикот на фабриката за производство на стаклени елементи „Изо стакло“ – Прилеп, г-дин Драган Најдоски чиешто производи беа употребени за изработка на физичките модели испитувани во дисертацијата.

Благодарност за несебичната помош и достапност на вон. проф д-р Ѓорѓи Груевски од Факултетот за дизајн и технологии на мебел и ентериер, кој ни овозможи изведување на експерименталните испитувања во кои и самиот учествуваше.

Благодарност и до вон. Проф.д-р Зоран Ракичевиќ од Институтот за земјотресно инженерство и инженерска сеизмологија (ИЗИИС), како и на Никола, за стручната и логистичка помош околу експерименталните испитувања.

Благодарност за логистичката помош и до фирмите „ТИНГ Инокс“ од Кочани и „ПАП“ од Охрид.

Почит и благодарност до моите колеги и пријатели, соработници и истражувачи со кои заедно ги поминувавме овие години на усовршување и напредување во нашите кариери за поддршката и советите кои ги добивав во текот на истражувањата. Си знаете дека патешествието е незаборавно поради вас.

Иако нестручни во инженерството, моите пријатели заслужуваат посебна благодарност за нивното трпение, совети и бодрење во изминатите години, а и за непомалку важните забави и опуштање во моментите на криза.

На крајот, неможам да не ги споменам моите родители Менка и Илчо и брат ми Дарко на кои до бескрај им се заблагодарувам за целото време и внимание кои ми го посветија во текот на моите години на образование. Тие се причина за тоа која сум и каде сум денес.

БЛАГОДАРАМ!

Авторот

НОМЕНКЛАТУРА

r	Редукција на жица во матрица
d_0	Дијаметар на жица пред влез во матрица
d_1	Дијаметар на жица на излез од матрица
A_0	Напречен пресек на жица пред влез во матрица
A_1	Напречен пресек на жица на излез од матрица
ε_t	Вистинска релативна деформација
l_0	Должина на жица пред редукција
l_1	Должина на жица по редукција
α_m	Влезен полуагол во матрица
Δ	Параметар
σ_d	Напрегање при извлекување
W	Работа од сила на влечење
w	Работа по единица волумен
w_u	Работа од хомогените деформации
w_r	Работа од нехомогените деформации
w_f	Работа од триење
Φ	Фактор на работа од нехомогени деформации
μ	Коефициент на триење
P	Притисок во матрица
μP	Напрегање од триење
σ_b	Напрегање пред влез во матрица
ΔT	Пораст на температура
ρ	Густина на материјалот
c	Специфичен топлински капацитет
k	Фактор определен по експериментален пат
σ_a	Средна вредност на напрегање во жица за време на извлекување
R_{em}	Граница на течење на материјалот
V_0	Брзина на жица пред матрица
V_1	Брзина на жица на излез од матрица
D	Дијаметар на барабан од машината
ω	Аголна брзина на барабан
L_d	Должина на деформациона зона
T_{max}	Максимална температура на површината на жицата
F_{zi}	Сила во жица
k_i	Крутост на жица
x_{zi}	Линиско поместување на жица на излез од матрица
x_{mi}	Линиско поместување на жица пред влез во матрица
x_{ki}	Линиско поместување на жица кај подвижниот елемент

F_i	Сила со која подвижниот елемент ја затега жицата
m_i	Маса на подвижниот елемент
x_i	Поместување на подвижниот елемент
\dot{x}_i	Брзина на подвижниот елемент
α_i	Агол меѓу правецот на жицата и правецот на подвижниот елемент
b_{di}	Коефициент на придрушување во подвижниот елемент
F_{vi}	Сила со која жицата се извлекува низ матрица
$F_{\mu i}$	Сила на триење во матрица
J_i	Момент на инерција на барабан
b_i	Коефициент на триење во барабан
$\ddot{\phi}_i$	Аголно забрзување на барабан
$\dot{\phi}_i$	Аголна брзина на барабан
ϕ_i	Аголно поместување на барабан
R	Радиус на барабан
M_i	Вртежен момент од актуаторот
F_{TRi}	Сила на отпор во подвижниот елемент
$Q_{xi}, Q_{\phi i}$	Генерализираната сила
M_{Li}	Момент на оптоварување на барабан
M_{TRi}	Момент на триење на барабан
δA_i	Витруелна работа
$\delta \phi_i, \delta x_i$	Витруелно поместување
E_K	Кинетичка енергија
R_s, R_r	Отпорност на статор, ротор
L_m	Главна индуктивност на магнетизирање
L_{ls}, L_{lr}	Растурна индуктивност на статор, ротор
L_s, L_r	Индуктивност на статор, ротор
ω_e	Фреквенција на побудата приложена на статорот
ω_o	Фреквенција на вистинската брзина на моторот
ω_r	Фреквенција на лизгање
s	Лизгање
Y	Просторен вектор
Sq	Реален дел на просторниот вектор
Sd	Имагинерен дел на просторниот вектор
a	Комплексен оператор
θ_e	Агол меѓу просторните вектори на статорската струја и роторскиот флукс
θ_o	Агол меѓу статорскиот и роторскиот координатен систем
θ_a	Позиција на роторската струја
p	Оператор при Laplace-трансформација
u_s	Напон на статор
i_s, i_r	Струја на статор, ротор
ψ_s, ψ_r	Магнетен флукс на статор, ротор
α, β	Компоненти на просторните вектори во неподвижен координатен систем врзан за оската на статорот
d, q	Компоненти на просторните вектори во ротирачки координатен систем врзан за оската на просторниот вектор на роторскиот флукс

T_e	Електромагнетен момент на мотор
τ_r, τ_s	Временска константа на ротор/статор
σ	Константа на индуктивноста
θ	Аголна позиција на ротирачки просторен вектор на магнетен флуks
$u(t)$	Излез од PID контролер во време t
$e(t)$	Грешка на влез во PID контролер во време t
K	Засилувач на PID контролер
T_I, T_D	Временска константа на интегрирање, диференцирање
$u(k)$	Излез од PID контролер во чекор k
$u(k-1)$	Излез од PID контролер во чекор $k-1$
$e(k)$	Грешка на влез во PID контролер во чекор k
$e(k-1)$	Грешка на влез во PID контролер во чекор $k-1$
T	Период на ажурирање
$u_P(k)$	Пропорционална големина во чекор k
$u_I(k)$	Интегрална големина во чекор k
$u_D(k)$	Диференцијална големина во чекор k
$w(k)$	Посакувана вредност во чекор k
$m(k)$	Измерена вредност во чекор k
G_P	Пропорционален засилувач
G_I	Интегрален засилувач
G_D	Диференцијален засилувач
K_R, K_L	Константа
U_d	Еднонасочниот меѓунапон
u_{A0}, u_{B0}, u_{C0}	Трифазни напони на излез од инвертор
u_{AN}, u_{BN}, u_{CN}	Фазни напони
u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}	Линиски напони
u_{N0}	Напон помеѓу неутрална точка на напојување и неутрална точка на мотор
T_{PWM}	Период на семплирање
T_1, T_2, T_0	Времиња на вклучување/исклучување на соодветни просторни вектори
$U_{s[\alpha, \beta]}$	Просторен вектор на статорскиот напон
$U_x, U_{x\pm 60}$	Секторски просторни вектори
O_{000}, O_{111}	Нулти вектори
ΔU	Пад на напон

1. ВОВЕД

Конструкциите од стакло кои се сè поактелни претставуваат нов тренд на дизајнирање и проектирање, и во исто време предизвик за инженерите да ги истражуваат можностите на стаклото како материјал и неговата употреба како дел од одговорни конструктивни елементи. Со истражувањето од оваа дисертација се дава удел во определување на овие можности.

Во оваа глава дадени се мотивацијата на истражувањето, прегледот на постојните истражувања, како и предметот, целите, применетата методологија во истражувањето и значењето на резултатите од истражувањето.. Како основна мотивација за истражувањето, објаснета е потребата од обемни теоретски и експериментални истражувања за определување на јакосно-механичките карактеристики за новиот предложен концепт на хибриден конструктивен елемент изработен од стаклен панел и челична плоча, со цел вака формираните конструктивен елемент да може практично да се применува.

Понатаму, даден е осврт на постојните истражувања, при што се опфатени голем број на трудови во последните години, како и тековни истражувања од областа. Од оваа анализа и од анализата дадена во мотивацијата, може да се заклучи дека истражувањето во дисертацијата е актуелно и е компатибилно со истражувањата кои се спроведуваат во европските истражувачки центри, односно е дел од истражувања опфатени со поширока истражувачка мрежа на институции од Европската унија. Спроведената методологија на истражувањето во целост одговара со поставените цели и хипотези, кои се дадени во оваа глава. На крајот од оваа глава е даден осврт на значењето од истражувањето и опис на структурата на дисертацијата.

1.1. МОТИВАЦИЈА ЗА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Употребата на стаклото во конструкциите е актуелна веќе декади наназад кога овој материјал бил користен главно поради неговите основни карактеристики на транспарентност и пропуштање на светлина. Со модернизирањето на дизајнот на конструкциите се тежнее фасадата да биде потранспарентна поради што стаклото станува главен избор за оваа намена. Во прво време во позадина на ваквата фасада функционира носечка челична конструкција која ги превзема делумно оптоварувањата кои делуваат од околината – оптоварувања нормални на самиот панел (оптоварување од ветер) и оптоварувања во рамнината на панелот. Меѓутоа истражувањата се прошируваат и инженерите започнуваат да ја испитуваат способноста на овој крт материјал самостојно да ги издржи и пренесе кон фундаментите силите кои му делуваат. Првата конструкција изведена целосно од стакло – Zappi, е и првиот посериозен научен проект од кој започнува користењето на стаклото не само како декоративен туку и како конструктивен елемент и станува важен дел од самата носечка конструкција. Како конструктивен елемент треба да ги издржи и да ги пренесе оптоварувањата кои делуваат на конструкцијата од нејзиниот покрив кон основата, како и да ја стабилизира и зајакне истата. Со ваквата употреба на стаклото, се добиваат конструкции кои се целосно транспарентни и кои во позадина може но и немора да содржат челична носечка конструкција.

На времето на внесување промени во носечката конструкција односно вклучување на стаклото како конструктивен елемент, му претходи воведување на зајакнувачки технологии – калење, преку што се делува на механичките карактеристики на стаклото. Стаклото како аморфен материјал кој во основа има ниска јакост на затегнување и задоволителна јакост на збивање, претставува крт материјал кој доживува лом без предупредување веднаш штом се постигне максималната јакост, односно се јавува лом без пластични деформации, за разлика од челикот кај кој е присутна и област на пластифицирање пред да настане лом. Со воведувањето на постапките на зајакнување се зголемува значително носивоста на стаклото преку создавање на напони на притисок во површината на елементот кој се зајакнува. Оваа специфична напонска состојба која ја има стаклото по зајакнувањето го менува и механизмот на лом на елементите од калено стакло. Имено, обичното конструктивно стакло се крши на поголеми парчиња кои претставуваат потенцијална опасност за луѓето во и покрај конструкцијата во која се употребува. Од друга страна, големината на парчињата на кои се крши калено стакло е

приближно колку дебелината на елементот. Поради ова, речиси е задолжителна употребата на калено стакло во конструкциите за запазување пред се на безбедноста на околината. Специфичната напонска состојба на површината на каленото стакло, дополнително оневозможува ширење на постоечките микропукнатини и грешки кај стаклените елементи предизвикани во текот на самото производство кои на подолг временски период под дејство на оптоварување претставуваат сериозна причина за лом на стаклото. Единствен недостаток на каленото стакло е фактот што ова стакло не смее да биде механички обработено (сечење, дупчење) откако ќе заврши постапката на калење.

Иако со технологиите на зајакнување на стаклото се постигнува зголемување на носивоста од јакосен аспект, сепак останува проблемот на деформациите кои може еден стаклен елемент да ги издржи без да настане лом. Во насока на ова, во последните две децении интензивно се користи ламинирано стакло кое се добива со поврзување на два или повеќе стаклени панели со тенки полимерни филмови (PVB – поливинил бутирал, EVA – поливинил ацетат, Sentry Glass). При употреба на ламинирано стакло, лом на еден од панелите во ламинатот не значи и лом на целиот ламиниран панел. Доколку не се превземе ништо, а ламинираниот панел е сеуште под дејство на оптоварувањето на крај може да се очекува лом поради зголемени деформации и појава на ползење. Поради овие карактеристики, ламинираното стакло уште се нарекува и безбедносно стакло бидејќи го намалува ризикот при појава на лом затоа што малите парчиња се задржуваат на полимерниот филм.

Појавата на ламинираното стакло и неговата примена блиску се врзува со новиот тренд на истражувања во областа на конструктивното стакло – стаклени носечки елементи. Во последната деценија интензивно се испитуваат носечки елементи, носачи и столбови направени целосно од стакло. По првите испитувања во оваа област се воведува и нов ефект во дизајнот, а тоа е зајакнување на стаклениот носечки елемент со челични профили, јажиња, карбонски влакна итн., кои функционираат во најслабата област на стаклото, а тоа е областа на затегнувачки напони. Една од целите на ваквото механичко зајакнување е можноста со овие стаклени елементи да се добијат и конструкции на повеќе катови. Ова може да се постигне бидејќи зајакнувањето ја менува напонската состојба и ја зголемува носивоста на елементот по појавата на првиот лом во него.

Поврзано со претходното, последните години истражувањата во областа на зајакнати стаклени носечки елементи се проширува и на самите фасадни панели. Логиката на зајакнување кај носечкиот елемент како што е носачот или столбот, се применува и кај панелите кај кои се јавува специфична напонска и деформациона состојба

поради самата геометрија. Како резултат на односот на должината на страните и дебелината на еден панел, се добива состојба на панелот која е во рамките на теоријата на тенки плочи и големи деформации, што не е случај со гредните елементи. Ова претставува посебен предизвик бидејќи од напонската состојба на еден панел зависи и неговата функционалност како носечки елемент.

Се поголемата употреба на стаклото во конструкциите ја наметнува потребата од развој на нови решенија за конструктивните елементи. Хибридниот конструктивен елемент изработен од стаклен панел и перфориран челичен лим претставува едно ново иновативно решение кое од една страна обезбедува транспарентност и можност за проектирање на засенувањето односно дисперзијата на светлина, а од друга страна овозможува зголемени механички и безбедносни карактеристики на конструктивниот елемент. Сепак, примената на стаклото и иновативните конструктивни елементи е се уште предмет на многубројни истражувања ширум светот. Во таа насока, во тек е и подготовка на Eurocode стандард за испитување и пресметка на конструкции од стакло, што е причина денес, секој новитет во ваквите конструкции да биде поединечно испитуван и евалуиран.

Со воведување на стаклото како конструктивен материјал и се поголемата употреба во фасадите на објектите, се интензивира неговото значење во животот на корисниците од аспект на транспарентноста и пропуштањето на светлината – се добиваат работни простори со поголема провидност. Од друга страна пак, во одредени ситуации сеуште присутна е потребата од засенување на просториите односно насочување на надворешната светлина кон просторот на корисникот.

Друг проблем кој се јавува кај употребата на стаклените елементи како конструктивни е нивната специфична јакосна состојба. Имено, самите механички карактеристики на материјалот стакло повлекуваат потреба од посебно внимание врз јакосните карактеристики на еден конструктивен елемент направен од овој материјал. Кртоста, ниската затегачка јакост и добрата јакост на притисок се основните особини на стаклото поради кои при изработката на елементи од стакло и потребно е посебно внимание на дизајнот и тестирањето. Кога стаклениот елемент добива главна улога во носечката конструкција од посебно значење се неговите јакосни и деформациони карактеристики бидејќи тие се витални за да се гарантира безбедноста при неговото користење.

Првото барање може да се исполни со употреба на перфорации кои нема да ја нарушат јакосната состојба на панелот и ќе ја задржат транспарентноста на стаклото, а ќе

го ограничат пропуштањето на светлината преку можност за засенување. Од друга страна ако ова перфорирање се изврши на материјал кој има соодветна пластичност, јакост и дуктилност се добива можност за решавање и на вториот проблем – зајакнување. На тема зајакнување на конструктивни елементи од стакло актуелни се многу истражувања меѓу кои преовладуваат истражувањата на носачи и столбови, а во поново време и начини на зајакнување на панели.

Хибридниот конструктивен елемент изработен од стаклен панел и челична плоча со отвори претставува едно ново, иновативно решение кое истовремено ја задржува транспарентноста, а обезбедува јакосна состојба на намалени напони во стаклениот панел и зголемени механички карактеристики. За да може вака формируваниот конструктивен елемент практично да се применува потребно е да се извршат обемни теоретски и експериментални истражувања за определување на јакосно-механичките карактеристики на елементите.

1.2. ПРЕГЛЕД НА ПОСТОЕЧКА ЛИТЕРАТУРА

Можностите за употреба на стаклото како конструктивен материјал за витални елементи во конструкциите се активно истражувани во последните 20тина години. Цел на многу испитувања е интегритетот на стаклените елементи во конструкцијата и механичките карактеристики кои тие ги нудат поединечно и во комбинација со елементи од други конструктивни материјали. Поврзано со ова, посебна област на истражување претставуваат врските за поврзување на стаклените елементи во конструкциите но и врските во формирањето на хибридниот елемент. Од друга страна пак, бидејќи се работи за крт конструктивен материјал, од посебен интерес претставува капацитетот на носивост кај хибридниот материјал по појава на лом на стаклениот елемент. Па така, проблемите од механика на лом се анализираат опсежно преку различни експериментални истражувања кои многу често преставуваат и верификација на нумеричкото моделирање и анализа на овие проблеми. Мултидисциплинарниот пристап во употребата на стаклото опфаќа не само исполнувања на архитектонски барања туку и инженерска потврда, и како резултат на ова се добиваат многубројни концепти во кои стаклото се докажува како конструктивен материјал погоден за изработка на самонесечки елементи. Потребата сите овие концепти да се потврдат експериментално е резултат на непостоењето на стандарди за пресметка и употреба на стаклото за носечки елементи во конструкцијата. Во таа

насока, секој заклучок од истражувањата придонесува кон дефинирање на нови стандардни аналитички методи прифатливи во проектирњето на конструкции од стакло.

Тргувајќи од традиционалната употреба на стаклото како фасаден елемент чијашто функција е чисто архитектонска без носечки карактеристики, неколку важни истражувања постојат во областа на врски изведени со лепење по рабовите на елементот. Daniel Mosibob прави испитувања на носечки плочест фасаден елемент под дејство на оптоварувања во рамнината на елементот при различни гранични услови. Тој во своите испитувања го разгледува елементот во услови на потпирање со механички врски како и со врски со лепење по рабовите на елементот. Големината на деформацијата, напонската дистрибуција и локалното влијание на соседните елементи во конструкцијата ги претставуваат аспектите на анализа при споредбата на овие два вида на потпирање на испитуваните концепти. На крајот од испитувањето направен е избор на соодветната врска за употреба на елементот како елемент со носечка функција во конкретна конструкција. Граничните услови освен различни видови на потпирање вклучуваат и различни видови на оптоварувања, во рамнината на панелот кое предизвикува смолкнување односно извивање на елементот, комбинација на претходното оптоварување со оптоварување кое ја симулира нормалната компонентна на оптоварување од ветер како и дополнување од притисна сила на смолкнување. Методот кој е користен за анализа на моделите вклучува нумеричко моделирање и анализа со помош на конечни елементи со кои со линеарна и нелинеарна анализа на извивање добиени се механичките карактеристики на панелот во симулираните услови. Валидацијата на резултатите е направена со експериментални испитувања на концептите во реална големина и услови на потпирање и оптоварување.

Во истата област, испитувања на врски добиени со лепење по рабовите на елементот прават Wellershoff и Sedlacek. Тие го испитуваат овој вид на врски кај плочест елемент од стакло преку промена на видот на лепилото и споредба на нивниот деформационен капацитет како и различни аналитички методи за пресметка на ваквите врски. Со внесување на различни функции на носивост во аналитичките методи, се истражуваат можностите за употреба на елементите во различни форми, како носачи, столбови или како делови од хибридни елементи. Во посебно испитување разгледувана е врска изведена со лепење која се користи за потпирање во четири точки на нов хибриден елемент од стакло и челик, што претставува комбинација на граничните услови и технологијата на спојување од претходните испитувања. Кај овој тип на врска, испитувани се механичките карактеристики, носивоста и влијанието на напонската дистрибуција во стаклениот елемент во комбинација со однесувањето на стареење на лепилото.

Huveners се придружува на испитувањата во областа на спојување со лепење по рабовите на стаклените елементи. Тој во едно од своите истражувања дава механички модели за системи за прикачување на фасадни стаклени елементи со користење на конструктивни лепила при фиксирањето на елементот во рамката. Сите споменати истражувања се однесуваат на влијанието на врската добиена со лепење врз преносот на оптоварувањата кон стаклениот елемент.

Актуелноста на техниката на спојување со лепење кај конструкциите кои вклучуваат стаклени елементи предизвикува развој и во индустријата за производство на конструктивни лепила. Нивните можности за употреба во вакви конструкции се испитувани во различни истражувања (Louter, Overend). Veer испитува конкретни лепила со високи механички особини кои зајакнуваат под дејство на УВ светлина во конструкции направени целосно од стаклени елементи. Заклучува дека ваквите лепила имаат голем потенцијал во употребата кај вакви конструкции пред се поради технологијата на лепење која се користи, и тоа преку конкретни проекти кои се изведени во склоп на истражувањето.

Со појавата и употребата на термички третирани стаклени елементи, се актуелизираат се повеќе истражувањата на механичките врски изведени со завртки посебно проблемот на концентрација на напони околу отворите во стаклениот елемент што претставува главен проблем кај зајаканатите елементи. Wellershoff (2006) и Engelhart (2007) вршат испитување на механизмот на пренос на оптоварувањата во директниот контакт помеѓу работ на стаклениот елемент и контактните елементи направени од термопластика или гума. Тие ги испитуваат ваквите врски во случаи на комбинирани оптоварувања кои предизвикуваат напрегање на смолкнување и свиткување на стаклениот елемент. Во овие испитувања фокусот се задржува на концентрацијата на напони кои може да ги надминат дозволените и да доведат до инстантен лом на стаклениот елемент. Како дополнување на овие истражувања се нумеричкото моделирање и анализа на механичките врски со завртки извршено од Maniatis кој нумерички симулира ваков дизајн на врска под дејство на оптоваруваа во рамнината на елементот, а потоа истото експериментално го верификува преку модели во реална големина.

Меѓутоа во ниеден од овие случаи не постои композитно однесување на елементите од челик и стакло туку само употреба на елементите од челик во преносот на оптоварувањата и активирање на стаклената плоча како носечки елемент. Истражувања од овој тип се изведени од страна на Netusil и Louter кога композитен (хибриден) елемент од стакло и челик добиен со линеарна атхезивна врска функционира како целина во облик на греден носечки елемент – носач. За да се добие хибриден елемент од стакло и челик

споен со лепило кој ќе функционира како композит, потребно е да се постигне пренесување на високи лонгитудинални сили на смолкнување помеѓу елементите.

Постојат истражувања во областа на спојувања со лепење (Overend et al. 2010; Belis et al. 2011) каде се испитуваат најсоодветните лепила за нивна употреба кај хибридни конструкции. Резултатите од овие истражувања покажуваат дека силиконите се користат за добивање на флексибилна врска помеѓу елементите во фасадната конструкција додека пак акрилните и лепилата на база на смола кои имаат многу повисоки механички карактеристики се користат за врски кај композитни елементи.

Од друга страна, Silvestru ги испитува карактеристиките на лепилата кои се користат кај хибридна плочеста сендвич структура под дејство на нормална компонента на ветер, оптоварување на притисок, и оптоварување во рамината на елементот. Во едно од своите истражувања тој заклучува дека лепилата кои се базираат на силикон се погодни кога се работи за оптоварување кое предизвикува свиктување во елементот додека пак се несоодветни при зголемени напрегања на смолкнување.

Calleweart и Dieter, заедно ги испитуваат проблемите на појава на лом кај врски изведени со лепење помеѓу стаклен елемент и елемент од челик. Тие потврдуваат дека не постои соодветен критериум за лом кај ваквите врски и дека просечната јакост на смолкнување кај врските со преклоп не е доволен критериум за проектирање и пресметка. Тие вршат нумеричко моделирање и анализа на стандарден тест на врска со преклоп и заклучуваат дека дебелината на лепилото игра најголема улога во однесувањето на врската со лепење при напрегања на смолкнување.

Во истражувањата на Nhamoinesu и Overend (2012) се испитувани хибридни модели со мали димензии за избор на соодветен тип на лепило при добивање на врската кај композитот каде главни критериуми се добивање кохезивен или атхезивен лом на кој му претходни соодветна пластична деформација во лепилото, релативно висока флексибилност на врската, соодветна смолкнувачка јакост како и минимално намалување на механичките карактеристики при промени во температурата. Како продолженија на овие испитувања следат испитувањата на механичките карактеристики на хибриден елемент добиен со лепење на стаклен елемент и челични профили. Хибридниот елемент е испитуван во различни концепти на сендвич структурата, еден каде учествуваат два надворешни слоја од стаклен плочест елемент и другиот концепт со асиметричен пресек каде едниот надворешен слој (во зоната на затегачки напони) претставуваат челичните профили додека наврешниот слој во зоната на притисни оптоварувања има стаклен плочест елемент. Јадрото на структурата е слојот од конструктивно лепило со незначителна дебелина во однос на останатите слоеви. Концептите се испитувани нумерички и експериментално преку стандардизирани испитувања и тоа во два различни

размери, мали модели и модели во реална големина на фасаден елемент. Во услови на чисто свиткување добиени се механичките карактеристики на хибридниот елемент кој нуди зајакнување и намалување на напоните во стаклениот елемент.

Истражувањата изведени од страна на Weller опфаќаат испитување на концепти на хибридни елементи изведени од стакло и челик добиени со лепење. Тој експериментално ги испитува можностите на техниката на спојување со лепење со различни видови на лепила при различни практични апликации на врски помеѓу стаклен елемент и челичен елемент кои формираат врска за спојување во точка. Овие врски ги испитува и во други истражување во кое преку експериментална и нумеричка анализа врши пресметка на овој вид на врска. Нумеричката анализа е изведена со помош на метод на конечни елементи. Експерименталните испитувања се изведени според неколку стандарди, стандардно испитување со затегнување, пендулум тест со ударно оптоварување и испитување со константно долготрајно оптоварување за добивање на соодветните јакосни карактеристики. Поврзано со врските со лепење, извршени се испитувања на влијанието на површината на елементите кои се спојуваат врз карактеристиките и однесувањето на врската и можности за изнаоѓање на соодветни модификации на површината со цел нивно подобрување.

Weller е истакнат и со истражувањата изведени на тема нови концепти на хибридни конструкции и определување на карактеристиките, можностите и однесувањето на хибридни конструкции во различни форми. Тој се занимава со испитување на концепти на хибридни гредни елементи изведени од стакло и челик како нови решенија за употреба во контрукции од стакло. Разгледува различни пресеци на хибридните носачи и нивни варијации во зајакнувањето. Она што е заедничко е што во пресекот стаклениот елемент претставува ребро, додека останатите елементи се изведени од челик во вид на фланши или зајакнувачки ленти и јажиња поврзани за стаклениот елемент со помош на лепила. Механичките карактеристики на композитите ги одредува со стандардизирани експериментални испитувања на свиткување со потпирање во четири точки. Со помош на добиените резултати ги верифицира нумерички добиените резултати за начинот на лом при напрегање од свиткување. Резултатите од испитувањето се однесуваат на одредување на оптоварувањето кое доведува до лом и преостанатата носивост на елементот по појава на првиот лом. Во истото истражување направена е споредба помеѓу деформациониот капацитет на хибриден носач од стакло и поликарбонат како зајакнувач и носач направен од ламинирани слоеви од стакло под дејство на краткотрајни оптоварувања. Дополнително акцент во истражувањата дава на избор на соодветен вид на челикот кој се користи во зависност од јакосните особини на челичните елементи испитувани на затегнување.

Во неколку свои истражувања Weller се фокусира на плочести сендвич структури. Овие хибридни елементи се анализирани во различен состав. Во едно од испитувањата предмет на истражување се концепти на хибридни плочи составени од стакло и поликарбонат како јадро на структурата. При експериментални тестирања со потпирање во четири точки, добиен е преостанатиот капацитет на носивост кај ваквите структури по појава на лом на стаклениот елемент.

Поврзано со претходното, во голем број апликации на стаклените елементи од големо значење е преостанатата носивост на елементот и можноста истиот да не ги нарушува интегритетот и безбедноста на конструкцијата по појава на лом. Затоа често, предмет на истражувања се хибридни конструкции кои во себе содржат одредена форма на зајакнување која ја гарантира носивоста на елементот по појава на прв лом. Истражувања од овој тип се извршени од страна на Carvalho, Cruz и Veeg кои ги испитуват карактеристиките на ламиниран стаклен елемент во кој во текот на ламинирањето помеѓу слоевите од стакло е вметнато парче од перфориран лим. На овој начин се добива зајакнат хибриден елемент чиешто однесување е проверено преку експериментални испитувања и нумеричка анализа. Носивоста кај овој елемент во голема мера зависи од полимерниот материјал кој е употребен за изведување на ламинацијата. Испитувањето на овој материјал е важно посебно од аспект на промената на механичките карактеристики во услови на зголемени температури и појава на ползење. Анализата е извршена и од аспект на карактеристиките на зајакнувачкиот материјал, па така направена е споредбена анализа на капацитет на зајакнување со неперфориран челичен елемент и перфориран челичен елемент на модели со мали димензии при испитување со затегнување со цел да се добие однесувањето во услови на смолкнување на композитниот елемент.

На овие истражувања се надоврзува и истражувањето на Feirabend кој претходно претставената форма на зајакнување ја користи за добивање на хибриден елемент од стакло и челик кој го испитува во услови на напрегања од свиткување. Механичките услови на елементот ги добива при краткотрајни оптоварувања нормални на рамнината на самиот елемент и во услови на зголемени температури. Дополнително го испитува капацитетот на преостанатата носивост на елементот по појава на првиот лом, шемата на кршење и ефектите на засенување кои ги нуди ваквиот елемент употребен во конкретна фасадна конструкција.

Според актуелните истражувања, главниот фокус кај конструкциите од стакло е сигурно определување на механичкото однесување на стаклениот елемент во конкретната форма и услови на експлоатација. Во исто време, земено предвид дека се работи за крт материјал кој доживува инстантен лом, врските за пренесување на оптоварувањата и напрегањата кон стаклениот елемент мора да одговорат соодветно со

цел избегнување на концентрација на напони и порамномерно напрегање на елементот. Во контекст на истото, предложените концепти од истражувањето подлежат на нумерички и експериментални анализи со цел определување на нивните механички карактеристики.

1.3. ЦЕЛИ, ХИПОТЕЗИ И МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Првата цел на истражувањето е да се најде соодветниот аналитички модел кој ќе ја опфати пресметката на јакосната и деформационата состојба на концептите под дејство на апцираното оптоварување. Во областа на употреба на стаклото како конструктивен материјал во кој сеуште не постојат воспоставени стандардни пресметки кои валидно ги дефинираат јакосните карактеристики на стаклените елементи, секое поединечно истражување придонесува. Затоа е пракса секој нов концепт кој вклучува елемент од стакло биде експериментално испитан со што се верифицира секој обид за нумеричко или аналитичко решавање на моделот.

Хибридните панели од челик и стакло кои се предмет на ова истражување се формираат со спојување со лепење на овие два нееднородни материјали. Со тоа се создава нова структура која има различни механички карактеристики од механичките карактеристики на секоја компонента поодделно. За ваквите панели да имаат практична употреба потребно е прецизно определување на напонско-деформационата состојба. Затоа главната цел на истражувањето е определување на механичките карактеристики на хибридните панели во целина. Користејќи го методот на конечни елементи се анализираат различни хибридни модели, а резултатите се верифицираат со експерименталните испитувања на предложените концепти. На тој начин се добива јасна претстава за напонско деформационата состојба и влијателните параметри за нејзина промена при оптоварувања нормални на површината на панелот.

Влијанието на дебелината на стаклото при проектирањето на хибридните плочи, како и влијанието на типот на перфорацијата на челичниот лим се главните конструктивни параметри кои може да предизвикаат значителна промена на однесувањето на панелите. Затоа една од целите на истражувањето е детално да се проучат овие влијанија преку нумерички модели верифицирани со експериментални истражувања.

Главната хипотеза од која започнува истражувањето вели дека со формирањето на хибридна структура, односно плочест елемент од метал и стакло, се обезбедуваат подобрени механички карактеристики на конструктивниот елемент и можност за параметарско проектирање на елементот од аспект на јакосни карактеристики, транспарентност и пропустливост на светлина. Оваа хипотеза е надополнета со помошните хипотези кои тврдат дека нумеричкото моделирање може да се употреби за оцена на напонско-деформационата состојба на целосна конструкција доколку се изврши верификација на резултатите со експериментални истражувања на стандардизирани модели – епрувети. Дополнително, геометриските карактеристики (дебелини) на компонентите од хибридниот елемент влијаат врз напонско деформационата состојба на елементите, а со ремоделирање на формата и големината на перфорацијата на лимот, се менува јакосната и деформационата состојба на целиот хибриден панел. Последната помошна хипотеза на главната, тврди дека карактеристиките на врзниот слој влијаат врз јакосните карактеристики на хибридниот елемент и предизвикуваат локални ефекти поради дејство на тангенцијалните напрегања и евентуалн грешки предизвикани од технологијата на создавање на врската.

Методологијата на истражување се базира пред сè на основната методска постапка - анализа, со помош на која се добија особините на моделот што е главен предмет на истражувањето. Со примена на синтеза се дојде до заклучоците кои произлегуваат од самото истражување и сумирање на резултатите. Нумеричкото моделирање и анализа беа изведени со помош на метод на конечни елементи и истите се потврдија со помош на експерименталното испитување како посебен дел од методологијата на истражувањето.

Методологијата на истражувањето опфати:

- анализа на постоечките истражувања објавени во достапната литература;
- поставување на основните аналитички релации за определување на напонската состојба кај плочести хибридни елементи;
- определување на влијателните параметри врз однесувањето на конструктивните плочести хибридни елементи;
- Дефинирање на типот на материјалите кои се користат за добивање на физичкиот модел на хибридниот панел: рамно калено стакло, нерѓосувачки челик (inox), конструктивно лепило погодно за лепење на челик и стакло;
- Изработка на стандардизирани хибридниите модели во склад со барањата за тестирање на модели од стакло подложни на свиткување дефинирани во европските стандарди EN 1288-1 и EN 1288-3;

- Добивање на јакосните и деформациони карактеристики на реалните модели под дејство на свиткување од сили во четири точки;
- Експериментално и нумеричко одредување на влијанието на дебелината на стаклениот панел врз општата напонската состојба на хибридните панели;
- Експериментално и нумеричко одредување на влијанието на видот на перфорацијата на челичниот лим врз напонската состојба на хибридните панели;
- Разработка и анализа на резултатите добиени од секој модел поединечно.

1.4. ПРИДОБИВКИ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО

Резултатите од ова истражување имаат за цел да дадат концепт за конструктивно решение на еден нов хибриден елемент кој може да се употребува како носечки во една конструкција. Со ова решение се дава придонес кон истражувањата кои се актуелни во оваа област како и во примената на стаклото како конструктивен материјал. Хибридниот модел претставува функционална комбинација на челик со сè поактуелниот материјал - стакло, кој ги користи позитивните карактеристики на двата материјали во единствен елемент со подобрени механички својства и јакосни карактеристики.

Моделот од перфориран челичен лим и стакло вклучува иновативен инженерски пристап за решавање на актуелни проблеми во модерните конструкции и во исто време бара мултидисциплинарен пристап од конструктивен и архитектонски аспект. Според тоа, со новиот дизајн се предлага елемент кој во себе делумно ја содржи функцијата на челичната носечка конструкција која постои во позадина во многу од случаите на употреба на стаклото во објектите, а истовремено ќе го исполни и критериумот на функционалноста во користењето од аспект на оптимална распределба на светлината во просторот.

Користењето на лепилата е актуелно во дизајнот на конструкциите и врските пред сè во одговорни функции и неговата употреба во овој модел ја има истата улога. Досегашното лепење во точка (point fixing) во овој модел се проширува на лепењето по површина. Иако самото спојување и лепилата не се дел од истражувачките цели, преку експерименталниот дел од ова испитување индиректно ќе се испита и можноста на употреба на лепилата во вакво конструктивно решение од споени нееднородни

материјали. Неговата важност произлегува од фактот што најголемо влијание на пренесувањето на напоните од еден во друг дел од конструктивниот елемент го има врската што во овој случај е токму лепилото.

Од друга страна, ова истражување претставува вовед во посериозните истражувањата во оваа област во Р.Македонија. Со оглед на популарноста на употребата на новите конструктивни материјали и во нашата земја, концептот има можности да добие употреба во постоечките или нови објекти. Дополнително, земено предвид на сончевите денови кои ги имаме во нашата земја, и архитектонски е оправдано користењето на ваков елемент во конструкциите.

Од друга страна, по ова истражување останува простор за понатамошни истражувања на темата, од аспект на други видови на оптоварувања кои дејствуваат на еден носечки елемент кој е дел од конструкција: оптоварувања во самата рамнина на елементот, деформации при извивање, сеизмички оптоварувања итн. Овој концепт сам по себе е мултидисциплинарен и јавува потреба од исти такви испитувања за да се овозможи негова верификација од сите аспекти. Според тоа, истражувањето опфатено од оваа тема е одличен вовед во нова и атрактивна конструктивна област како што е употребата на конструктивното стакло кај нас и пошироко.

Деталните теоретски и експериментални истражувања даваат јасна претстава за однесувањето на предложените хибридни панели при оптоварувања нормални на површината на панелот со што се овозможува практична примена на новите хибридни панели обезбедувајќи безбедност и сигурност на конструкциите преку проектирање по методологија предложена во ова истражување.

По верифицирањето на нумеричките модели се добиваат релевантни прикази на моделите кои понатаму може да послужат за параметарска нумеричка анализа. На овој начин се добива метод со кој понатаму може да се врши истражување на различни варијации на димензионалните карактеристики, видот на оптоварувањата или различни карактеристики на материјалите. Преку нумеричка анализа во иднина економично може да се испитуваат и различни облици на перфорација и на тој начин да се направи оптимизација во насока на исполнување на двете главни функционални барања на моделот: пропуштање на светлина и оптимална напонска распределба во стаклениот панел.

1.5. ОРГАНИЗАЦИЈА НА ДИСЕРТАЦИЈАТА

Овој труд е организиран во седум глави кои претставуваат посебни целини во кои се дадени поединечните фази на истражувањето кои вклучуваат теоретска разработка на идејата, разгледување на веќе изведени проекти и истражувања во областа, експериментално испитување и нумеричко моделирање и анализа на предложените концепти за дефинирање на нивното механичко однесување.

Во **првата глава** од трудот дадени се мотивацијата на истражувањето, прегледот на постојните истражувања, како и предметот, целите, применетата методологија во истражувањето и значењето на резултатите од истражувањето. Најнапред се дадени воведни излагања на проблематиката разработувана во трудот и мотивацијата за истражувањето. Како основна мотивација за истражувањето, се потенцира потребата од обемни теоретски и експериментални истражувања за определување на јакосно-механичките карактеристики за новиот предложен концепт на хибриден конструктивен елемент изработен од стаклен панел и челична плоча, со цел вака формираните конструктивен елемент да може практично да се применува. Понатаму, даден е осврт на постојните истражувања, при што се опфатени голем број на трудови во последните години, како и тековни истражувања од областа, при што се истакнува актуелноста на проблематиката и се анализира можноста за користење на искуствата од претходните истражувања. Од оваа анализа и од анализата дадена во мотивацијата, може да се заклучи дека истражувањето во дисертацијата е актуелно и е компатибилно со истражувањата кои се спроведуваат во европските истражувачки центри, односно е дел од истражувања опфатени со поширока истражувачка мрежа на институции од Европската унија. Спроведената методологија на истражувањето во целост одговара со поставените цели и хипотези, кои се дадени во оваа глава. На крајот од оваа глава е даден осврт на значењето од истражувањето и опис на структурата на дисертацијата.

Во **втората глава** е даден осврт на примената на стаклото како конструктивен материјал. Најнапред, направен е преглед на изведени конструкции, а врз основа на актуелните трендови се заклучува дека со зголемувањето на мултифункционалноста и важноста на стаклото како конструктивен материјал, се отвораат многу можности и предизвици за истражување. Понатаму, даден е краток опис на технологијата на производство и на видовите стакло. Исто така, детално се разработени раздвоивите врски кај конструктивни елементи од стакло со цел да се добие јасна претстава за начинот на спојување. Бидејќи однесувањето на елементот кој е предмет на истражувањето зависи од

карактеристиките на стаклото како основен материјал, во оваа глава се дадени основните механички карактеристики на стаклото. Со цел да се обезбеди споредливост на резултатите од испитувањата на механичките карактеристики, одлучено е да се користат стандардизирани постапки на испитување. Поради фактот што веројатноста за лом на конструктивен елемент од стакло зависи од присуството на потенцијално критична грешка, во оваа глава опфатени се веројатносни методи кои можат да се користат за определување на јакосните карактеристики од аспект на механика на лом.

Третата глава од дисертацијата се однесува на конструктивните форми во кои се сретнуваат елементите изведени од стакло, со посебен акцент на хибридните структури во кои стаклото е поврзано со елементи изработени од други видови на инженерски материјали. На овој начин се потенцираат промените во употребата на стаклото кое добива одговорна функција како конструктивен елемент. Преку анализа на постојните истражувања и изведени објекти, претставени се гредни конструктивни елементи од стакло како дел од носечки конструкции, земајќи ги предвид нивните предности и недостатоци во употребата како и врските за нивно меѓусебно поврзување. Исто така, претставени се и други хибридни елементи што претставуваат композитни форми од стакло кои преку својата специфична структура нудат подобри механички карактеристики во однос на елементи изведени само од стакло. Овој тренд на подобрување на карактеристиките на стаклото резултира во промени и во видовите на врски кои се користат со цел зголемување на капацитетот на преостаната носивост по појава на лом на елементот од стакло, што е претставено во рамките на оваа глава.

Во **четвртата глава**, фокусот е ставен на хибридни плочести елементи од стакло и нивната структура кои претставуваат основа за предложените конструктивни елементи, предмет на ова истражување. Од анализираните концепти се заклучува дека традиционалниот пристап при дизајнирање на врските помеѓу стаклените елементи и останатите елементи во конструкцијата подразбира избегнување на директен контакт на стаклениот елемент и останати цврсти материјали, односно пренасочување на оптоварувањата или движењата подалеку од стаклениот елемент, а сè со цел подобрување на механичките карактеристики и добивање на композитно однесување на елементот. Токму поради ова се актуализира употребата на спојување со лепење, со што се елиминираат голем број недостатоци на механичките (раздвоивите) врски за спојување на стаклото. Во оваа глава е даден осврт на функционирањето и карактеристиките на ваквиот вид врски. На база на она што е веќе истражувано во областа на хибридните конструкции од стакло, дизајниран е новиот концепт на хибриден елемент составен од стакло и челик, како зајакнувачки материјал, што е предмет на истражување во

дисертацијата. Основната идеја и целта на предложениот концепт се објаснети во рамките на оваа глава. На крајот од главата е презентираан пристапот за добивање на специфичните перфорации и карактеристики на зајакнувачкиот слој преку користење на параметричко моделирање и анализа со методот на конечни елементи.

Петтата глава се однесува на аналитичките методи кои може да се користат за определување на напонско-деформационата состојба на конструктивни елементи, од аспект на примена на методот на конечни елементи (МКЕ). Најнапред се прикажани основните равенки на линеарната теорија на еластичност во матричен облик, што претставува најпогодна форма за формулација на методот на конечни елементи. Понатаму се прикажани основните равенки и расположливите типови на елементи за опишување на рамнинската состојба. Општата теорија на МКЕ станува значително поедноставна кога се применува на рамнински проблеми од теоријата на еластичност и е можност за лесна интерпретација на механичката смисла на чекорите при формулација на проблемот и за подетална анализа на локалните однесувања при анализа на хибридни структури составени од материјали со голема разлика во механичките карактеристики. Со оглед на видот на проблемот кој е анализиран во ова истражување, определувањето на просторна напонско-деформациона состојба со примена на методот на конечни елементи е даден во оваа глава. Бидејќи предмет на истражувањето се хибридни плочести елементи, во оваа глава се дава детален преглед на проблемот на свиткување на плочи со приказ на основните аналитички равенки и со осврт на проблемите при моделирање на свиткување на плочи со просторни елементи од МКЕ. Исто така, претставени се основните на анализа на свиткување при геометриски нелинеарности од големи деформации, што се користи при нумеричката анализа во истражувањето, како и осврт на анализата на ламинирани структури.

Шестата глава ги опфаќа експерименталните испитувања изведени во текот на истражувањето. Претставена е експерименталната програма во која се дадени фазите на испитувањето, а исто така е даден опис на примероците од конструктивните елементи кои се испитувани. Објаснет е методот на испитување и стандардот според кои се извршени тестирањата. Во оваа глава, претставен е и начинот на формирање на хибридната структура за примероците кои се предмет на испитувањето, како и целокупната постапка на испитување. Преку фотографии прикажани се делови од испитувањето и карактеристичните појави кои се јавуваат во текот на изведување на експериментот. На крајот од главата се дадени резултатите од испитувањето прикажани графички во споредбени дијаграми кои се детално обработени и анализирани.

Во **седмата глава** од дисертацијата обработени се нумеричкото моделирање и анализата со методот на конечни елементи за елементите кои се предмет на ова истражување. Нумеричкото моделирање и анализата на елементите од стакло и хибридните елементи ги содржи истите влезни параметри дефинирани во експерименталното истражување, вклучувајќи ги реалните гранични услови, надворешно оптоварување и механички карактеристики на употребените материјали. Преку верификација на нумеричкото моделирање со експерименталните истражувања, се потврдува применетиот нумерички метод, при што се дава осврт и на можните проблеми и ограничувања при примена на овој метод. Резултатите од нумеричката анализа се детално разработени и претставени во графички прикази за различни конфигурации, а исто така е направена споредбена анализа и претставени се соодветни графички прикази од споредбените резултати помеѓу експерименталните и нумеричките истражувања.

Во **осмата глава** се дадени заклучните согледувања и препораките за идни истражувања. Се заклучува дека новопредложените концепти на хибридни елементи може да придонесат во интегритетот и сигурноста на носечката конструкција. Овие концепти на ламинирани структури ја содржат во себе логиката на веќе докажаните елементи од ламинирано стакло кои активно се користат во практиката, преку задржување на безбедноста која ја нудат ваквите елементи, а делумно ги елиминираат нивните недостатоци пред сè во однос на вкупната маса на елементот. Во однос на механичките карактеристики, кај хибридните елементи се потврдува најважната карактеристика на преостанат капацитет на носивост по појава на првиот лом со што се потврдува зајакнувачката функција на самата структура на елементот.

2. ПРИМЕНА НА СТАКЛОТО КАКО КОНСТРУКТИВЕН МАТЕРИЈАЛ

Стаклото како материјал е познато од многу одамна, а неговата употреба во конструкциите започнува во моментот кога е воведен првиот процес за производство на рамни плочести елементи. Во прво време употребата е чисто архитектонска и тоа како елемент кој служел за одделување на просторот од надворешната околина во конкретни отвори од конструкцијата. Денешната употреба на стаклото добива нов аспект, кога тоа се јавува како носечки елемент во склоп на конструкциите.

Оваа негова форма е од интерес за истражувањето кое е дел од тезата и со цел да се објасни и оправда неговата примена, во оваа глава даден е осврт на стаклото како конструктивен материјал. Опфатени се неговите карактеристики, процеси за добивање како и начини за негово зајакнување. Однесувањето на елементот направен од стакло во голема мера зависи од карактеристиките на материјалот што е цел на истражување на многу актуелни проекти во областа. Една од главните задачи на истражувањата е определување на јакоста на еден стаклен елемент која заради неговата карактеристична микроструктура често теоретски претпоставена не е се поклопува со онаа експериментално испитана. Во контекст на ова, во главата накратко се претставени неколку досега предложени методи за што поточно теоретско определување на јакоста на еден елемент направен од стакло.

Во главата е претставена и актуелната состојба во однос на стандардите за проектирање на конструкции од стакло, а на крајот од главата даден е осврт кон видовите на механички врски кои се користат за поврзување на елементите од стакло и проблемите кои се јавуваат кај ваквите видови на врски.

2.1. СТАКЛОТО ВО АРХИТЕКТОНСКИТЕ КОНСТРУКЦИИ

Првите објекти изведени со сидови од стакло се револуционерни конструкции кои претставуваат архитектонско експериментирање со формите, нови конструктивни материјали и дотогашниот изглед на објектите. Прв стаклен павиљон од овој тип претставува објектот на Philip Johnson, Glass House во New Canaan, САД (слика 2.1). Овој транспарентен павиљон изграден во 1949 година е составен од метална носечка конструкција, која ги пренесува вертикалните и хоризонталните товари кон основата на објектот, на која е потпрена лесна покривна конструкција и е исполнета со сидови од стакло за одделување на ентериерот од надворешната околина. Сидовите од стакло служат за формирање на целината на објектот и внесување на транспарентност. Ерата на новиот дизајн на конструкции од стакло каде најголем фактор зема токму оваа потреба од транспарентност и визуелно губење на границите на просторот со околината започнува оттука. Како резултат на ова почнуваат истражувања на можностите на стаклото да стане самоносечки елемент во ваквите конструкции со цел да се намали на минимум видливата носечка конструкција. Објект кој ги потврдува овие промени е Apple store, во New York, изведен во 2011 година каде е избегнато користењето на носечки челични елементи (слика 2.2). Надворешниот дел од објектот претставува целосно стаклен самоносечки павиљон каде елементите одговорни за пренесување и превземање на товарите се направени од стакло, а меѓусебно поврзани со челични елементи за врска.



Слика 2.1: Green House, САД



Слика 2.1: Apple store, New York

Комбинирањето на стаклото и челикот сепак останува тренд кај повеќекатните конструкции, каде целосното елиминирање на челичната носечка конструкција е

невозможно. Пример за ваква на изглед едноставна конструкција каде преовладува транспарентноста, енергетската ефикасност и просторноста е претставништвото на Merck-Serono во Женева, Швајцарија изведена во 2007 год (слика 2.3). Објектот претставува реновација на постоечки објект каде е додаден атриум целосно изведен од стакло и челична носечка конструкција во висина на постоечкиот објект. Карактеристичен дел од конструкцијата претставува покривот на атриумот изведен исто така од челик и стакло кој под дејство на хидраулични актуатори има способност да се отвара и затвара. На овој начин, заедно со системот за засенување на дел од фасадната конструкција се зголемува енергетската ефикасност на објектот со промена на климатските услови во внатрешноста.



Слика 2.3: Мерк – Serono, Швајцарија



Слика 2.4: World Trade Organisation, Швајцарија

Употребата на стаклото често се поврзува со функционалноста и енергетската исплатливост на објектите. Токму поради ова при проектирањето секогаш се земаат предвид овие фактори. При проектирањето на објектот на World trade organisation – WTO, во Женева, Швајцарија во 2013 год. (слика 2.4), целосно се вклучени енергетските карактеристики на стаклото. Стаклото во оваа конструкција се користи за внесување на целосна транспарентност и внесување на природна светлина во просторот ограничен од единечна фасада каде е искористено рефлектирчко стакло кое ги задоволува стандардите за енергетска ефикасност. На самите стаклени панели, со цел делумно засенување на работниот простор, со печатење нанесени се форми од фолии. Овие фолии освен архитектонски не влијаат дополнително на функционалноста на панелот.

Земено предвид сето претходно кажано, се наметнува прашањето за капацитетот на транспарентност која е всушност потребна кај конструкциите од стакло и тоа не само од архитектонски аспект туку и од енергетски и етички. Одржувањето на приватноста, задоволување на конкретни функционални потреби и зголемување на енергетската ефикасноста се само дел од факторите кои влијаат на потребната транспарентност на елементот од стакло. Ова придонесува кон вметнување на фактор на засенување во трендот на проектирање на конструкциите од стакло и тоа директно преку фасадни елементи на конструкцијата. Вака проектиран објект е EPFL quartier nord, во Ecublens, Швајцарија изведен во 2014 год. каде на дел од фасадната конструкција додадени се обоени стаклени елементи поставени под агол кои овозможуваат специфично засенување на внатрешниот простор (слика 2.5 и 2.6). Со вакви промени во проектирањето на конструкциите од стакло се зголемува мултифункционалноста и важноста на стаклото како конструктивен материјал, а трендот на внесување на дополнителни барања за подобрување на конструкциите отвара многу можности и предизвици во истражувачката област.



Слика 2.5: EPFL quartier nord, Швајцарија



Слика 2.6: Засенување преку фасадни елементи

Со зголемување на примената на стаклото како материјал во конструктивните елементи и промените кои настануваат при проектирањето на ваквите конструкции се јавува потреба од стандардизирани пристапи на проектирање за пресметка и контрола на истите. Постоечките европски стандарди за проектирање на конструкции ги дефинираат основните принципи на проектирање при конкретни услови на оптоварување, а одредувањето на механичките карактеристики е предвидено да се добие на експериментален начин. EN 1990 е стандард кој ги опфаќа основите на проектирање на конструкции и во себе не содржи принципи за проектирање на конструкции од стакло иако дел од принципите дефинирани тука може да се употребат кај ваквите конструкции. Во овој стандард се предвидува проектирање при гранична состојба, одредување на граничната состојба за нормална експлоатација и трајност на конструкцијата. За стаклото

како конструктивен материјал од основна важност е определување на толеранцијата на оштетувања (грешки) при оваа гранична состојба.

Сепак постојат неколку стандарди и регулаторни правилници во поразвиените земји во светот кои се однесуваат на конструктивната примена на стаклото, а дел од нив се однесуваат на енергетската ефикасност при неговата употреба. Меѓутоа, овие стандарди генерално се однесуваат на класификацијата на различни видови рамно стакло, методи за негово тестирање и определување на механичките карактеристики на плочи од стакло (определување на тврдоста, јакоста на свиткување и отпорност на удар), однесување и отпорност при експлозии (САД), толеранции при производство на елементи од стакло, видови на потпирање (Шпанија) итн. Дел од ISO-стандардите пак покриваат и проблеми во однос на трајноста и изгледот на стаклени панели.

Но, не постојат стандарди кои во себе ги вклучуваат правилата на проектирање на конструкции од стакло, новитетите во неговото производство, димензионалните граници на произведените елементи од стакло, формите во кои се произведуваат како и конкретните функционални примени кои ја надминуваат познатата форма на фасадна конструкција.

Сето ова е причина за отпочнување на многу проекти во склоп на Европската унија за формирање на нови Еурокодови кои во себе ќе ги опфатат сите понови трендови во проектирањето на конструкции од стакло и ќе дадат различни пристапи за проектирање кои ќе се однесуваат на елементи од стакло како и дизајнирање на врските помеѓу ваквите елементи под различни видови на оптоварувања и услови на експлоатација.

Иницијативата за формирање на нов Еурокод започнува во 2007 година од страна на Joint Research Centar – JRC во склоп на Европската комисија со предлог за нови водичи во проектирањето на конструкции од стакло врз основа на потребата дефинирање на методи и принципи за проектирање на механичките карактеристики на стаклото, сигурност, стабилност и отпорност на пожар, нивниот век на експлоатација и исплатливост. Во иста насока во склоп на ваквата иницијатива продолжува и COST TU0905 Акцијата која започнува во 2010 година и во чиј склоп функционираат повеќе работни групи со цел придонесување кон формирањето на Еурокодот за конструкции од стакло. На почетокот на 2014 година како резултат на ваквите проекти во областа на конструктивното стакло, во склоп на работната програма на Европскиот комитет за стандардизација објавен е европски водич за проектирање на конструкции од стакло како најава за официјалниот Еурокод на истата тема кој се очекува официјално да биде промовиран во 2019 година [vodicot referenca].

Следејќи ги постоечките активности во областа на конструктивното стакло се потврдува актуелноста на темата и можностите кои доаѓаат како резултат на многуте истражувања во оваа област кои сеуште траат и придонесуваат во методите за проектирање за сигурност кај конструкциите од стакло.

2.2. ТЕХНОЛОГИЈА НА ПРОИЗВОДСТВО И ВИДОВИ НА СТАКЛО

Стаклото претставува неорганско соединение од молекули кое се добива со ладење на неговата течна фаза до температура на транзиција T_g кога преминува во цврста фаза без појава на кристализација. Како резултат на својата аморфна структура од поврзани молекули, стаклото се карактеризира со голема кртост.

Зависно од хемискиот состав стаклото се јавува во повеќе видови. Едно од нив е силикатното стакло кое во својот состав има голем процент на силициум диоксид или силика. Многу често во растопената фаза се додаваат и дополнителни хемиски компоненти кои влијаат на особините на мешавината, појавата на гасни пори (меури), точката на топење. На овој начин добиената мешавина од силика, сода (натриум оксид) и калциум оксид е материјалот кој ние денес го знаеме како стакло и кое наоѓа најголема примена како конструктивен материјал. Во оваа теза се обработува овој вид на стакло и поимот стакло ќе се однесува на овој хемиски состав. Во табелата 2.1 дадени се елементите кои најчесто се додаваат во составот на стаклото како материјал.

Силикатното стакло се добива со топење на мешавина од сировини (силика, вар, сода, алуминиум и мали количини на агенси за добивање на пофина структура) во печка за стакло која работи на температури 1600 – 1800 °C. Овие температури зависат само од видот на печката и од хемискиот состав на мешавината.

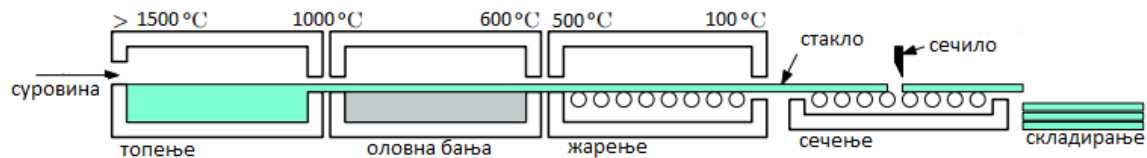
Табела 2.1 Хемиски состав на стакло (EN572-2, 2004)

Хемиска компонента	ознака	присуство %	влијание
силициум диоксид (силика)	SiO ₂	69-74	основа за добивање на стаклото
Калциум оксид	CaO	5-14	
натриум оксид (сода)	Na ₂ O	10-16	ја намалува точката на топење
магнезиум оксид	MgO	0-6	
алуминиум оксид (алумина)	Al ₂ O ₃	0-3	
друго (Fe ²⁺ и Fe ³⁺)		0-5	

Стаклото се смета за идеално еластично дури и на температури од 100°C . Неговите механички карактеристики се сметаат независни од времето во повеќето конструктивни примени, освен во случај на пожар.

На температури над 500°C стаклото треба да се разгледува како вискозна течност. Неговата вискозност се зголемува со намалувањето на температурите се додека вискозоста не се зголеми доволно да стаклото се однесува како цврсто тело. Токму оваа појава се користи во процесот на добивање на стаклото.

Процесот за добивање на таканаречено „рамно“, „пловечко“ стакло бил откриен од страна на Sir Alistair Pilkington во 1953 год (слика 2.7). Мешавината од растопени суровини се внесуваат во оловна бања каде стаклото почнува да лебди над оловото и се распределува еднакво на површината. На овој начин се добиваат тенки и речиси идеално мазни паралелни површини. Потоа следи постапка на жарење каде стаклото целосно преминува во цврста состојба. Последната фаза е добивање рамно стакло кое се сече во потребните димензии. Едната страна на стаклото која е во допир со оловото може во себе да зароби мала количина олово што понатаму влијае на неговата јакост како и можноста за појава на грешки во површината.



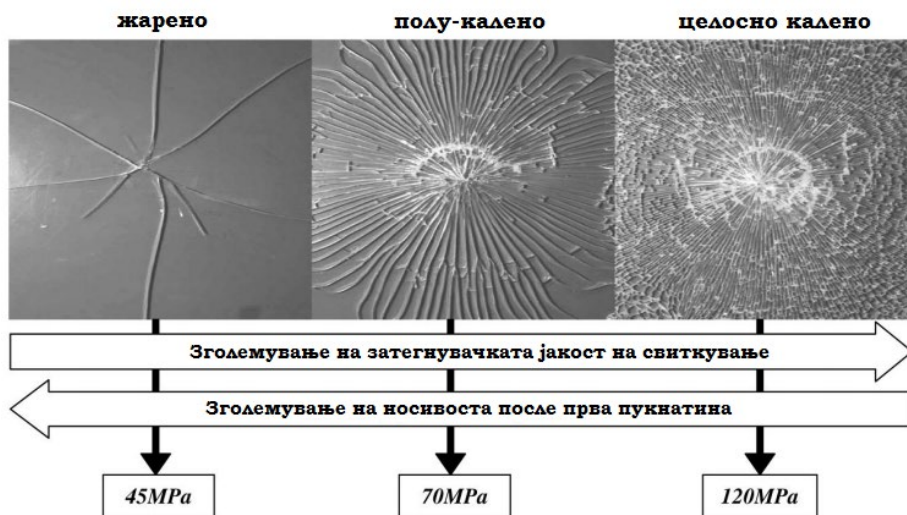
Слика 2.7: Производствен процес на стакло

Добиеното стакло на овој начин, може да се произведе во различни стандардни метрички номинални дебелини: 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19 и 25mm. Стаклото кое плови во оловната бања во атмосфера на азот или водород, се шири до дебелина од 6mm, потоа ширењето престанува поради појава на затегнување во површинските слоеви. Помали дебелини се добиваат со растегнување на стаклото во фаза додека плови во оловната бања и се лади на површината, а поголеми пак дебелини се добиваат со ограничување на површината на пловење. Од друга страна, димензиите на панелот кој се добива како производ зависат од производствената опрема. Стаклото кое се добива на овој начин се нарекува жарено стакло.

По добивањето на стаклото во процесот опишан на слика 2.7, стаклените панели често дополнително се обработуваат за да се добијат продукти со форма, перформанси и изглед кои ќе задоволат конкретна употреба. Во овие процеси за дополнителна обработка спаѓаат:

- сечење за да се отстранат можни грешки во рабовите и да се произведе стаклен панел во форма и димензија која е потребна
- обработка на рабовите (брусене, полирање)
- правење отвори
- свиткување (за добивање на свиткано стакло)
- аплицирање на површински хемиски слоеви
- термичка обработка (зајакнување)
- термичка обработка за намалување на шансите за појава на пукнатини поради присуство на никел-сулфид во составот на стаклото.
- ламинирање за зголемување на капацитетот на издржливост (носивост) по појавата на прва пукнатина, отпорност на удар, отпорност на куршум, огноотпорност и акустични својства.
- модифицирање на површината поради декоративни причини

Една од поважните дообработки на жареното стакло е термичката обработка - калење. Таа опфаќа повторно загревање на стаклото и брзо ладење со цел зголемување на механичките карактеристики на стаклото и елиминирање на одредени недостатоци во структурата на материјалот. Термички обработеното стакло има променета напонска состојба која влијае на видот на лом кој го доживува стаклото (слика 2.8). Начинот на лом е функција од складираната енергија во стаклото односно збир од заостанатите напони кои се резултат на постапката и напоните предизвикани од надворешните оптоварувања. Овие разлики влијаат негативно на капацитетот на преостаната носивост по појава на прва пукнатина кога елементот е во форма на ламинирано стакло. Така, жареното стакло се крши на големи и остри парчиња кои се посебно опасни за околината и затоа ваквото стакло ретко се користи за конструктивни елементи со одговорни функции.



Слика 2.8: Видови на лом кај термички обработено стакло

Ова може да се промени во случај кога ваквиот вид стакло е под дејство на надворешни смолкнувачки оптоварувања кога енергијата која се складира во материјалот поради еластичните деформации може да предизвика лом како кај полу-каленото стакло. **Полу-калено стакло** се крши на помали парчиња и има зголемена јакост во однос на жареното. Стакло кое е најприменувано во конструкциите е **целосно калено стакло** (во продолжение во истражувањето ова стакло ќе биде именувано – **калено стакло**) кое доживува лом на многу ситни парчиња со што се зголемува безбедноста на околината во случај на ненадеен лом. Покрај овие начини на зајакнување постои и начин на хемиско зајакнување на стаклото. **Хемиски зајакнатото** стакло има поголема јакост меѓутоа помали максимални дебелини на обработка од полу-каленото стакло. Дополнително, постапката за негово добивање е многу скапа и поради тоа неекономична за производство на конструктивно стакло.

Калењето како термичка обработка претставува процес на повторно загревање и брзо ладење на стаклото со што се овозможува заробување на напони во површината на материјалот. Специфичната напонска состојба која се добива е претставена од напони на притисок во површината на материјалот и затегачки напони во средината (јадротото). Ова овозможува зголемување на затегачката јакост која е слабост на стаклото како конструктивен материјал, а зголемување на збивачката јакост (слика 2.9). Со овие механички особини дополнети со безбедносниот аспект на обликот на лом, каленото стакло станува најупотребуван вид на стакло во конструктивното инженерство и апликации каде безбедноста е приоритет.

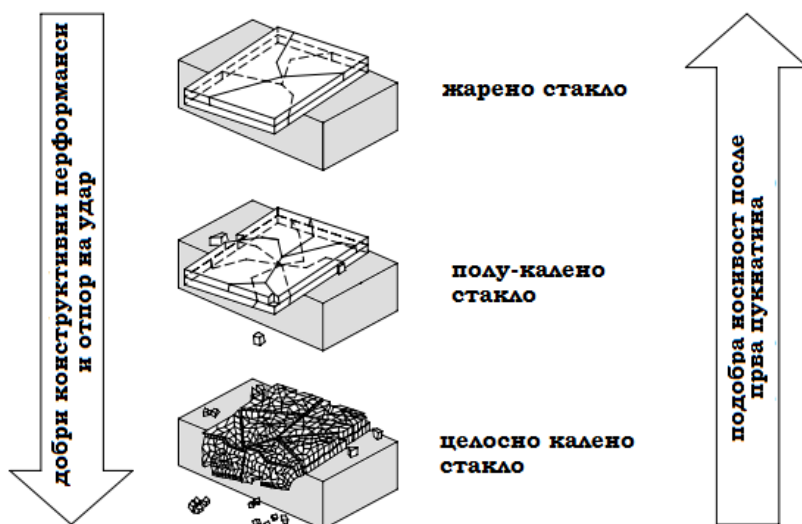
Негативната страна на овие резултати од калењето е фактот што каленото стакло не смее да биде дополнително механички обработувано (сечење, отварање отвори) што значи дека мора да се подложи на калење во крајна форма за употреба. Друга негативна карактеристики е можноста кај целосно каленото стакло да се појави лом поради вклучоци на никел-сулфид во неговиот состав. Овој недостаток сепак се надминува со специјална термичка постапка за остранивање на овие вклучоци, која има за цел да ја намали веројатноста за појава на спонтан лом на стаклото, или механички со употреба на ламинирано стакло, вклучување на дополнителен заштитен слој кој би ги задржал парчињата од ломот.



Слика 2.9: Напонска состојба на термички обработено стакло

Една од формите во кои се употребува стаклото во конструкциите е единечно стакло кое се добива всушност од процесот на производство. Ваквата форма се употребува на места каде стаклото не дефинира носечки елемент. Кога стаклото треба да се употреби во фасада или како носечки елемент (носач или столб) се користи **ламинирано стакло**. Ова стакло претставува комбинација од две или повеќе стаклени плочи кои меѓусебе се врзани со мек транспарентен полимер кој најчесто е поливинил бутирал (PVB), ЕВА филм или најновиот SentryGlass, кои освен механичките влијанија може да имаат и посебни влијанија како на пример PVB кој спречува UV-зрачење речиси целосно. Добивањето на ламинираното стакло вклучува посебен процес каде во специјални печки и под дејство на

притисок се врши најпрво загревање, а потоа и лепење под притисок за да се истисне секаков воздух кој би предизвикал пори помеѓу стаклото и полимерот. Иако со термичката обработка на стаклото се зголемува неговата јакост, сепак стаклото е крт материјал. Најголемата предност која се добива со ламинирање е зголемената преостаната носивост на елементот и појава на прва пукнатина во моментот на надминување на максималната јакост на стаклото. Оваа особина се должи на тоа што скршените парчиња од стакло се задржуваат на полимерниот филм кој се користи и преку меѓусебно дејство ја зголемуваат носивоста на елементот. Оваа носивост се зголемува со зголемување на големината на скршените парчиња, што значи дека ламинирано стакло од жарено и полу-калено стакло има поголема преостаната носивост во однос на случајот кога се употребува целосно калено стакло. Носивоста на ламинираното стакло зависи и од видот на полимерниот филм. Бидејќи овие материјали имаат виско-еластични својства, нивните перформанси зависат од температурата и од времетраењето на оптоварувањето. Од друга страна пак како резултат на напонските состојби после термичка обработка, ламинираното стакло направено од калено стакло има најдобри конструктивни перформанси и отпорност на удар (слика 2.10).



Слика 2.10: Особини на различни видови ламинирано стакло

2.3. МЕХАНИЧКИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА СТАКЛОТО

Кртите материјали, како керамиките имаат многу позитивни механички карактеристики поради кои ја оправдуваат својата важност во конструктивното инженерство, висока тврдост, јакост и модул на еластичност, задржување на високата јакост и при зголемени температури, хемиска инертност што ги прави отпорни на одредени видови на корозија итн. Во табелата 2.2 дадена во продолжение, претставени се најважните механички карактеристики на конструктивното стакло кои се сретнуваат во литературата. Густината на стаклото е слична на густината на бетон, додека пак модулот на еластичност е сличен на алуминиумот како конструктивни материјали. Коефициентот на топлотно ширење и топлинската спроводливост на стаклото, го прават погоден материјал за комбинирање со останатите конструктивни материјали меѓутоа изборот мора да се прави внимателно поради големите разлики во вредностите на овие величини. Она што го прави стаклото препознатлив конструктивен материјал е неговата висока збивачка јакост, а од друга страна ниската затегачка јакост. Втората карактеристика, е од посебно значење поради употребата на стаклото во носечки елементи од конструкциите и посебно влијае врз јакоста на свиткување на ваквите елементи. Дополнително е за забележување што вредноста на оваа величина може да варира под влијание на повеќе фактори, појава што е објаснета во продолжение на оваа глава.

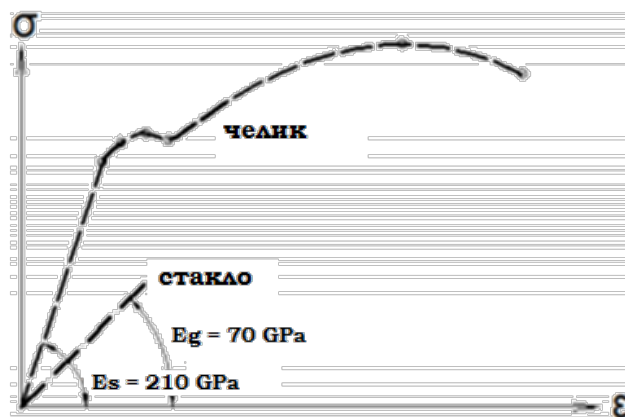
Табела 2.2 Најчесто употребувани механички карактеристики на стаклото на собна температура

Величина	Ознака	Единица мерка	Вредност
Температура на транзиција	T_g	$^{\circ}\text{C}$	564
Модул на еластичност	E	GPa	70
Модул на лизгање	G	GPa	28
Поасонов коефициент	ν	-	0.23
Коефициент на термичко ширење	α	10^{-6}K^{-1}	9.10
Затегачка јакост*	R_m	MPa	20 - 100
Збивачка јакост*	R_z	MPa	>800
Густина	ρ	kg/m^3	2500
Специфичен топлински капацитет	c_p	J/kgK	720

Топлинска спроводливост	λ	W/mK	1
-------------------------	-----------	------	---

* вредностите може да варираат во зависност од составот и други параметри

Карактеристиката напон – издолжување на стаклото претставува линеарна зависност каде после достигнување на точката на пропорционалност структурата на стаклото не дозволува појава на пластични деформации и затоа ломот се случува ненајавено (слика 2.11). Поради кртата структура на стаклото, кај елементите од стакло нема појава на ползење бидејќи оваа појава е карактеристична за материјали кои пластично се деформираат. По престанокот на дејството на надворешното оптоварување, кај овие елементи нема трајни деформации, а дополнително поради отсуството на пластичност, тие се подложни на локална концентрација на напони. Последното, е главната карактеристика на стаклото која се зема предвид при користењето во конструкциите.



Слика 2.11: Дијаграм напон – единечно издолжување за челик и стакло

Стаклото има висока теоретска јакост која е определена од силите во меѓуатомските врски од структурата на стаклото. Според Orowan кој заедно со Irwin и Griffith работат на теорија за крт лом, теоретската вредност на напонот на лом σ_m , кој претставува напон потребен да се прекине меѓуатомска врска може да се добие според изразот:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{E\gamma}{r_0}}$$

каде: E – модул на еластичноста, σ – енергија на грешката и r_0 - рамнотежно растојание помеѓу атомите. Меѓутоа, поради специфичната атомска структура, теоретската и практичната јакост на свиткување на стаклото се разликуваат [Louter PhD]. Оваа разлика прв ја истражувал А.А. Griffith во 1920 год. кој тврдел дека на површината на секој стаклен продукт има ситни грешки кои предизвикуваат појава на локални концентрации на напони. Овие невидливи за голо око пукнатини го носат неговото име и претставуваат затегачки напони на површината на стаклото од каде и започнува пропагацијата на пукнатините. Бројот на овие грешки дополнително може да се зголеми по употреба на термичка обработка за зајакнување на стаклото.

Друг важен ефект кој го имаат површинските грешки врз структурниот интегритет на стаклото е статичкиот замор. Во литературата се сретнуваат различни поими за оваа појава, а Haldimann, Luble & Overend го воведуваат поимот напонска корозија за истата бидејќи претставува намалување на јакоста под дејство на напони кои не се променливи, а дејствуваат во комбинација со температурата на околината и релативната влажност. Во присуство на влажност, грешките имаат тенденција да пропагираат побрзо кога истите се подложни на позитивни напони на ширење на пукнатините односно затегачки напони. [structural use of glass]

2.3.1. СТАТИСТИЧКА ДИСТРИБУЦИЈА НА ГРЕШКИ

Јакоста на стаклото е директно поврзана со длабочината на критичната грешка на површината. Поголема длабочина на грешката води кон намалување на јакоста. Дополнително, земено предвид дека грешките се безредно распоредени по површината на стаклото, веројатноста за постоење на голема критична грешка која ја намалува јакоста на стаклото се зголемува со зголемување на димензијата на елементот. Дистрибуцијата на грешките, обликот и нивната ориентација се разликува од примерок до примерок од стакло. Експериментално се докажува дека јакоста на стаклото варира непредвидливо дури и кај идентични испитувани примероци под исти услови на оптоварување. Јакоста на материјалот според ова зависи и од волуменот на парчето кое се испитува, формата на примерокот и на видот на оптоварување. За одредување на јакоста под дејство на многуте

влијателни параметри потребно е да се користат различни видови на методи за веројатност, најмногу поради фактот што веројатноста за лом на елементот од стакло зависи од присуството на потенцијално критична грешка. [Weibull distribution in glass]

Одредувањето на јакоста на стаклото е посебна истражувачка област од механика на лом која вклучува пред сè статистички методи за одредување на оваа особина. Откако процесите за термичка обработка се актуелни, важи тврдењето дека механичката јакост на стаклото е всушност комбинација од неговата производствена јакост (која е функција од површинските карактеристики како што се ориентацијата, формата и големината на површинските грешки) и јакоста после термичко зајакнување која всушност е јакост која зависи од магнитудата на термички индуцираната пред-напрегната состојба на површината на стаклото. За одредување на веројатноста за појава на лом кај елементот, најчесто се користи Weibull-ова распределба.

За секој елемент од стакло може да се претпостави дека на површината постојат грешки, кои статистички може да се дефинираат како функција $f(L)$ за која важи дека на површина dA , веројатноста за постоење на грешка со димензија L може да се добие преку изразот: $f(L)dA$.

За да се добие веројатноста дека една површина A содржи грешка со големина $\geq L$, потребно е оваа површина да се подели на помали површини A/N . Веројатноста дека во ниеден од овие делови не постои грешка $\geq L$ може да се претстави како $1 - f(L)A/N$. Оттука веројатноста дека целата површина A не содржи грешка со димензии $\geq L$ изнесува:

$$(1 - f(L)A/N)^N \rightarrow e^{-Af(L)} \quad (2.1)$$

Од претходниот израз (2.1), за веројатноста дека на површината A постојат грешки со димензија $\geq L$ се добива

$$1 - e^{-Af(L)} \quad (2.2)$$

Доколку претпоставиме дека под дејство на надворешно оптоварување, примерок од стакло ќе доживее лом при постоење на грешка со димензија $\geq L_c$, тогаш веројатноста за лом се добива од изразот:

$$P_f = 1 - e^{-Af(L_c)} \quad (2.3)$$

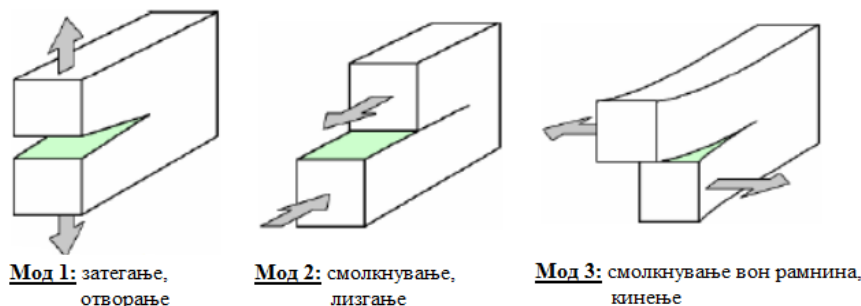
каде P_f ја дава веројатноста за лом, A претставува површина на стакленито елемент која е подложна на напонот предизвикување на пукнатина.

Од друга страна пак, ако се познати карактеристиките на критичната грешка, со употреба на квази-статичка линеарно еластична механика на лом ефектите од грешките и површинските пукнатини може да се земаат предвид преку фактор на интензитетот на напонот кој се определува според изразот:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{L} \quad (2.4)$$

каде σ претставува напон нормален на протегањето на грешката кој предизвикува нејзино настанување.

Индексот на факторот во равенката го определува модот на ширење на пукнатината. Постојат три мода на ширење на пукнатините зависно од оптоварувањето кое дејствува (слика 2.12).



Слика 2.12: Различни модови на ширење на пукнатината

Факторот K претставува интензитет на еластичен напонот на врвот од пукнатината [Haldimann et al., 2008]. Моментално кршење настанува во моментот кога овој фактор на интензитет на напонот поради појава на затегнувачки напони ќе ја постигне или надмине вредноста на факторот на интензитет на критичниот напон K_{IC} . Овој фактор се добива од:

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{L_C} \quad (2.5)$$

Од изразите (2.4) и (2.5) се добиваат релациите помеѓу критичната должина на грешката и напонот кој ја предизвикува:

$$L_C = \left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma} \right)^2, \quad \sigma = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{L_C}} \quad (2.6)$$

Според литературата [referenci od weibull folder], за определување на веројатноста за лом се користи методот на Weibull-ова распределба со два непознати параметри [referenca Weibull opst metod]. Според овој метод за веројатноста за лом се добива:

$$P_f = 1 - \exp \left(- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right) \quad (2.7)$$

Според изразот (2.7) се добива веројатноста да настане лом под дејство на напон σ . Двата параметри кои се вклучени во Weibull-овата распределба m (Weibull-ов модул), кој зависи од видот на стаклото и подготовката на површината и σ_0 , кој зависи од големината на површината, потребно е да се добијат по експериментален пат.

Со израмнување на изразите (2.3) и (2.7) се добива:

$$A f(L_c) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \quad (2.7)$$

Доколку во (2.7) се вклучи и изразот (2.6) за $f(L)$ се добива:

$$f(L) = \frac{1}{A} \left(\frac{K_{IC}}{Y \sigma_0 \sqrt{L}} \right)^m \quad (2.8)$$

Со цел да се добијат двата параметри на Weibull-овата распределба потребно е да се изведат обемни експериментални испитувања на јакоските карактеристики на елементи од стакло произведени на ист начин и со еднаква димензија.

Истражувањата кои постојат на оваа тема покажуваат многу недоследности при користењето на овој метод [Veer weibull distribution + the strength of glass], па многу автори и ја ставаат во прашање неговата употреба и предлагаат користење на други статистички методи [Louter PhD, Veer [Veer, 2007; Veer, Louter & Bos, 2009; Veer & Rodichev, 2009] and Calderone & Jacob [Calderone & Jacob, 2001]], меѓутоа до денес сеуште е актуелен при определувањето на практичната јакост на стаклото.

Начинот на одредување на јакоста кај термички обработеното стакло претставува проширување на претходно изложениот метод поради тоа што влијанието на површинските грешки врз јакоста е надополнета со состојбата на површината после обработката. Со цел да се постигне пред-напрегната состојба стаклото се загрева со цел рамномерно зголемување на температурите по дебелината после што следи брзо ладење со воздух. При брзото ладење надворешните слоеви побрзо зацврстуваат од јадрото што резултира во појава на заостанати напони на притисок на површината f_{rk} , а заостанати затегнувачки напони во внатрешноста на дебелината. На овој начин се зголемува затегнувачката јакост на стаклото. Крајната јакоста на вака третираното стакло се добива според температурата и времето на термичка обработка.

Друг пристап за одредување на јакоста е општоприфатениот метод на максимален напон. Тука се претпоставува дека целата површина на примерокот е под дејство на ист напон во два правци, кој е еднаков на максималниот главен напон кој се јавува, и дека површинските заостанати напони на притисок не варираат по површината.

Општо земено погоре споменатите методи вклучуваат сложени пресметки што најчесто води кон употреба на конзервативните методи за пресметка и проектирање според кои понекогаш производствената јакоста на стаклото изнесува нула. Заради ова активно се работи на стандардите за пресметка кои треба да вклучуваат методи за добивање на теоретската јакоста на стаклениот елемент која нема да се разликува во голема мера од експериментално добиената. Во неофицијалните верзии на европските стандарди предложени се два изрази за пресметка на проектираната јакоста на термички обработено стакло (израз 2.9 за жарено и израз 2.10 за калено стакло):

$$f_{g;d} = \frac{k_{\text{mod}} k_{sp} f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} \quad (2.9)$$

$$f_{g;d} = \frac{k_{\text{mod}} k_{sp} f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} + \frac{k_v (f_{b;k} - f_{g;k})}{\gamma_{M;v}} \quad (2.10)$$

каде $f_{g;k}$ означува карактеристична јакоста на свиткување на стаклото ($f_{g;k} = 45\text{N/mm}^2$); $f_{b;k}$ претставува карактеристична јакоста на свиткување на зајакнато стакло ($f_{b;k} = 70\text{N/mm}^2$) за полу-калено стакло, $f_{b;k} = 120\text{N/mm}^2$ за целосно калено стакло и $f_{b;k} = 150\text{N/mm}^2$ за хемиски зајакнато стакло); $\gamma_{M;A}$ парцијален фактор на материјалот за жарено стакло чијашто препорачана вредност е 1,8; k_{sp} е фактор за видот на површината на стаклото; k_{mod} е фактор кој го дефинира времетраењето на оптоварувањето; k_v претставува фактор на зајакнување на стаклото.

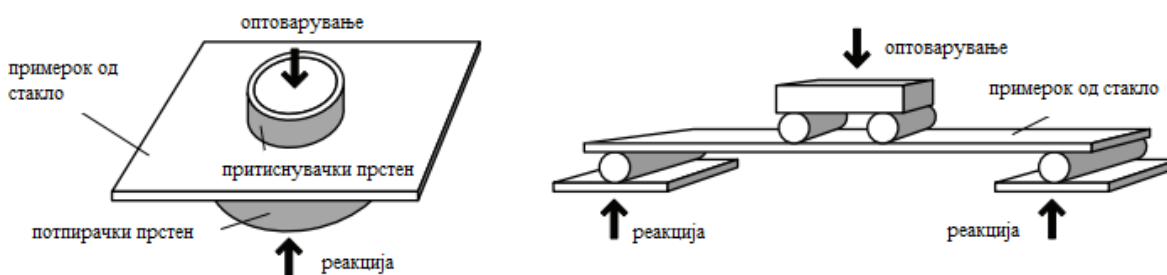
Иако според претходно кажаното површинските грешки и процесите за зајакнување на стаклото се директно поврзани со производствената јакоста на елементот од стакло, друг процес кој влијае врз неговата теоретска јакоста и потенцијално го ослабува елементот, е формирањето на отвори за завртки кои се користат кај механичките врски

изведени на овој начин. Влијанието на ваквите врски е подетално објаснето во продолжение на главата.

2.3.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА МЕХАНИЧКИТЕ КАРАКТЕРИСТИКИ

Експерименталното добивање на јакостните карактеристики на стаклото се врши преку стандардизирани постапки поделени во две групи на испитувања зависно од видот на оптоварувањето. Првата група на испитувања се однесува на испитувања со статичко долготрајно оптоварување кое најчесто се изведува со испитување при притискање во четири точки. Ова испитување уште е познато и како начин на определување на статичкиот замор. Постапката се состои од аплицирање на константно оптоварување при што се мери времето до појава на лом. На овој начин се испитуваат елементи чиито услови на експлоатација предвидуваат неизложеност на надворешни климатски услови (затворен простор) и носење на главно статички товар. Недостатокот на овој вид на определување на јакоста се однесуваат пред се на големото времетраење на испитувањето.

Испитувањето на динамичка замор на стаклото претставува општ поим кој се користи за испитувања со константна брзина на зголемување на вредноста на товарот, константно зголемување на напоните или за испитувања со повторливо оптоварување. Најчести форми на овој вид испитувања се испитувањето со притискање во четири точки (слика 2.12 десно) и испитувањето со концентрични прстени (2.12 лево).



Слика 2.12: Шематски приказ на методи за експериментално испитување на јакоста на стакло со концентрични прстени (лево), притискање во четири точки (десно)

Во испитувањата со притискање во четири точки се воведува еднооскино оптоварување на примерокот ($\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 = 0$), додека пак во испитувањата со концентрични прстени се користи двооскино оптоварување ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq 0$). Двата методи на испитување се временски краткотрајни испитувања од каде се добива јакоста на свиткување на примероците кои се испитуваат. Во Европа овие тестирања се стандардизирани во рамките на европските стандарди: EN 1288-1:2000 кој ги дава основите на испитувањата и условите на испитување, EN 1288-2:2000 и EN 1288-5:2000 кои се однесуваат на испитувањето со концентрични прстени при различни димензии на примероците и EN 1288-3:2000 кој се однесува на испитувањето со потпирање во четири точки. Во сите методи брзината на зголемување на напоните е дефинирана во границите на 2 – 0,4 MPa/s.

Тестирањето се изведува на примероци со состојба на површината добиена директно од производството или пак на примероци на чијашто површина вештачки се предизвикуваат грешки. На овој начин, резултатите кои се добиваат на крајот од испитувањата претставуваат комбинација од состојбата на површината на примерокот и пропагацијата на пукнатините во текот на испитувањето. Поради ова, се препорачува испитување на поголем број на примероци со цел статистички да се определи вредноста на јакоста на стаклото кое се испитува. [structural use of glass].

Стандардните испитувања со притискање во четири точки кои се опфатени во стандардот EN 1288-3:2000 се употребени и во склоп на истражувањето од оваа докторска дисертација. Со цел да се добие експерименталната јакост на свиткување потребно е да се испитаат елементи од стакло во димензии предвидени во самиот стандард. Кај овој вид на испитување, како релевантна област за набљудување се смета делот од примерокот помеѓу двата потпирачки ролери. Овој дел од примерокот е напрегнат на чисто свиткување, каде не постојат смолкнувачки сили. Успешно испитани примероци се сметаат оние каде местото на појава на критична пукнатина односно лом се наоѓа во оваа област. За да се обезбеди точно определување на јакоста на свиткување, потребно е да се изврши фина обработка на рабовите на парчето кое се испитува со цел да се избегнат влијанијата на грешките кои се јавуваат на рабовите при сечењето на стаклото (минимум 24 часа пред извршување на испитувањето). За да може да се лоцира местото на појава на критичната пукнатина пред настанување на лом на површината на парчињата се нанесува транспарентен филм кој има за цел да ги задржи парчињата од скршениот елемент. На крајот од испитувањето се забележува максималната сила на појава на лом која се користи

во изразот дефиниран во стандардот за пресметка на јакоста на свиткување добиена под условите на испитување:

$$\sigma_{bB} = k \left[F_{\max} \frac{3(L_s - L_b)}{2Bh^2} + \sigma_{bG} \right]$$

каде што: σ_{bB} - јакост на свиткување

k - бездимензионален фактор ($k=1$)

F_{\max} - максимална сила до лом

L_s - растојание помеѓу потпирачите од уредот

L_b - растојание помеѓу притиснувачките ролери

B - ширина на напречниот пресек на парчето

h - дебелина на парчето

σ_{bG} - напон на свиткување од сопствена тежина

Напонот на свиткување предизвикан од сопствена тежина се пресметува според следниот образец:

$$\sigma_{bG} = \frac{3 \cdot \rho \cdot g \cdot L_s^2}{4h}$$

каде што: ρ - густина на стакло

g - Земјино забрзување

Дополнително, од испитувањето може да се добие угибот на средината на испитуваниот примерок – u , кој настанува под дејство на оптоварувањето. Оваа деформација се добива со директно мерење или со емпириска пресметка според изразот дефиниран во стандардот:

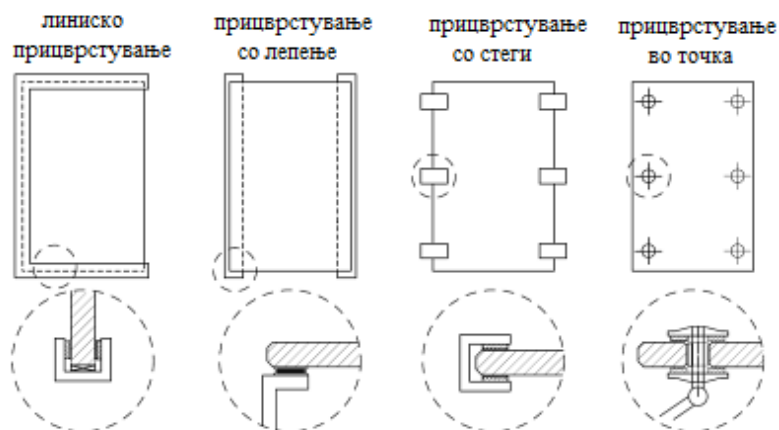
$$\frac{y}{h} = \frac{3}{4} \frac{F_{\max}}{EBh^4} \left[\frac{L_s^3}{3} + \frac{L_b^3}{6} + \frac{L_s L_b^2}{2} \right]$$

Во склоп на истражувањето спроведено во склоп на дисертацијата, експериментално добиените резултати за јакост на свиткување на елементите од стакло и хибридни модели, понатаму се користат како контролни и влезни параметри при дефинирање на нумеричките модели и анализа.

2.4. РАЗДВОИВИ ВРСКИ КАЈ КОНСТРУКТИВНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ ОД СТАКЛО

Традиционалниот пристап при дизајнирање на врски помеѓу стаклените елементи и останатите елементи во конструкцијата подразбира избегнување на директен контакт на стаклениот елемент и останати цврсти материјали (метал) односно пренасочување на оптоварувањата или движењата подалеку од стаклениот елемент со цел избегнување на напонски концентрации кои се најголем проблем кај кртите материјали.

Хронолошки гледано промените во дизајнирањето на врските настануваат со појавата на линиско потпирање кое се поврзува со фасадните рамки развиено во средината на дваесетиот век, до употреба на завртки за поврзување во точка, метод развиен во 80-тите и 90-тите години од претходниот век (слика 2.13). Токму поради овие промени во развојот се појавува забележителна редукција на големината на елементите за врска, а во исто време зголемување на големината и видот на оптоварувањето кое се пренесува на стаклените елементи.



Слика 2.13: Најчесто употребувани начини на прицврстување кај елементи од стакло

Во сите видови на споменати врски се внимава на местото на контакт помеѓу стаклените елементи и металните елементи каде се вметнуваат посреднички материјали. Овие материјали мора да имаат задоволителна јакост и крутост, за да ги пренесат оптоварувањата, и адекватна трајност. Најчесто користени материјали за оваа намена се некои видови на полимери, смоли, неопрен, алуминиумски заптивки итн. Развојните промени поврзани со видовите врски за елементи од стакло се однесуваат на појавата на врски со лепење. Овие видови на врски отвараат можности за добивање на карактеристики кои е невозможни да се добијат со примена на механички врски, но во исто време исто толкав број на проблеми кои произлегуваат пред се од нивните хемиски карактеристики, трајноста итн. Во продолжение на оваа глава на кратко се објаснети видовите на врски кои денес се користат при проектирање на конструкции каде се вклучени стаклени елементи и истите се поделени во две главни групи: механички врски и врски добиени со лепење. Кај дел од видовите врски може да се јави и комбинација од овие две главни техники на поврзување со цел користење на предностите на двата вида на поврзување. Иако претпоставката е дека механичкиот елемент од врска кај ваквата комбинација е главниот елемент, сепак во случаи кога се користи круто лепило ова не е секогаш точно. Во врски каде учествува лепило со голема крутост, поголемиот дел од оптоварувањето го превзема токму овој елемент додека механичките елементи од врска се вклучуваат во превземањето само во моментите кога е исцрпен целосно капацитетот на носење на лепилото.

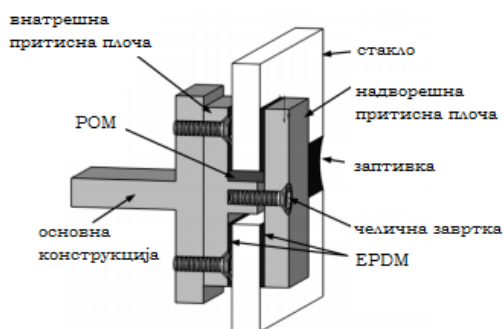
Врските изведени со завртки не се најсоодветниот начин за пренесување на оптоварувања кон екстремно крт материјал како што е стаклото меѓутоа се врски чијшто развој и употреба се актуелизира заедно со естетските барања за намалување на видливи метални елементи во врска. Во последните две децении постојано се вршат

подобрувања во насока на решавање на конкретни проблеми кај овие врски што резултира во голем број на видови врски каде учествуваат завртки.

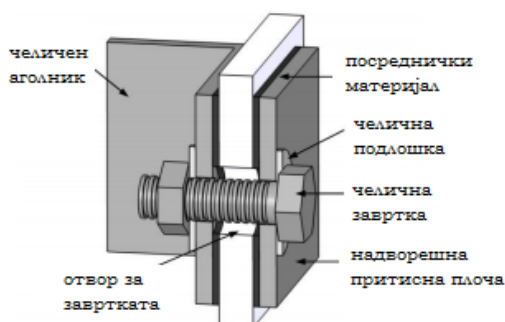
Доколку елементите кои се поврзуваат со завртки се направени од еласто-пластични материјали како што е на пример челикот, тогаш ваквата врска генерално е способна да ги пренесе високите напони кои се јавуваат околу отворите за завртките преку појава на локално “течење” на материјалот со што се добива голем капацитет на носивост. Доколку дополнително врска се состои од повеќе завртки, тогаш карактеристиките на еласто-пластичните материјали овозможуваат еднакво пренесување на товарот на сите завртки кои учествуваат во врска. Меѓутоа кога се користи материјал кој нема способност да се деформира пластично и со тоа да обезбеди редистрибуција на концентрираните напони кои се јавуваат околу отворите, тогаш овие локални концентрации на напоните околу отворите претставуваат голем проблем, како што е случај при употреба на стакло како екстремно крт материјал.

Стеги се видови на врски кои се развиени со цел да се намали визуелно присуството на елементите за врска кои не се направени од стакло, како на пример рамка и елементите од споредната конструкција кај врските со линиско потпирање.

Врската се остварува со употреба на стеги поставени на дискретни локации на работ на стаклениот панел кои во позадина се дел од внатрешна подконструкција (слика 2.14). Стеги кои работат на принцип на мало триење најчесто се употребуваат кај стаклени елементи кои треба да пренесат оптоварување кое дејствува нормално на нивната површина. Кај овој вид на врски, стегата претставува само елемент кој го држи стаклениот елемент на потребната позиција и е одделена од стаклената површина со посреднички материјал како на пример неопрен или EPDM гума (ethylene propylene diene monomer).



Слика 2.14: Стега



Слика 2.15: Фрикциони држачи

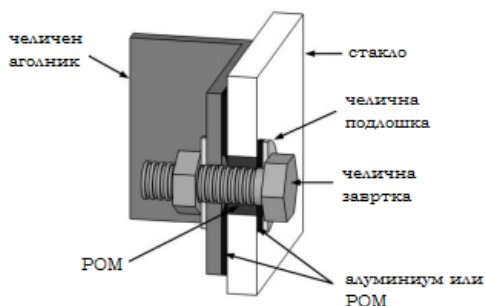
Другите видови на врски кои се користат кај овие системи се **фрикциони држачи** кои може да пренесат и оптоварувања во самата рамнина на стаклениот елемент (слика 2.15). Овие држачи работат на принцип на зголемено триење. Поради принципот на нивното функционирање, ваквото потпирање се користи посебно каде постојат затегачки

оптоварувања во рамнината на стаклениот елемент бидејќи не се создава концентрација на напони. Овие врски се состојат од челични плочи поставени на двете страни од стаклениот панел и завртки кои се користат за да ги притиснат двете плочи. Контактот помеѓу стаклото и челичните делови се избегнува со формирање на дупки за завртките поголеми од потребното и поставување на подлошки кои во исто време претставуваат и посреднички материјал. Овие подлошки мора да имаат доволна јакост да се спротистават на нормалните напони кои се јавуваат поради предзатегаето на завртките без притоа да се смени нивната позиција во спојот како и да ги издржат напоните на смолкнување кои се индуцирани од силите во рамнината на стаклениот елемент.

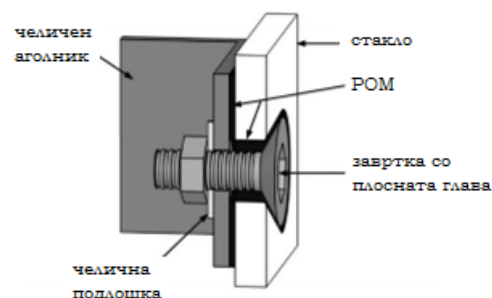
Големината на силата која може да се пренесе кај врските на принцип на триење зависи од геометријата на врската, јакоста и крутоста на вклучените материјали, најнисикиот коефициент на триење помеѓу раличните површини и носивоста на елементите од врската под дејство на долготрајни оптоварувања.

Она што е важно да се има предвид кај користењето на овој вид на врски е дека кај одредени геометрии на стаклениот елемент и локацијата на стегите, може да се јават ограничувања на ротацијата на стаклениот елемент што понатаму резултира во појава на концентрација на напони на местата на врска. Доколку не се овозможи соодветна ротација на работ на стаклениот елемент во стегата, на пример со користење на доволно мек и посреднички материјал, тогаш овие ограничувања мора да се земат предвид при моделирањето и анализата на врската.

Врските со стандардни завртки за поврзување на стаклени елементи претставуваат концепт на врска со завртка која поминува низ претходно подготвени отвори за сите елементи кои учествуваат во врската (слика 2.16). На овој начин врската е под дејство на затегнувачко и притисно оптоварување во рамнината на елементите кое се пренесува како смолкнувачко оптоварување во завртките. Оваа врска е директно превземена од конструкциите со челик и дрво и се користи пред се бидејќи обезбедува структурен континуитет помеѓу стаклените елементи, што е посебно корисно кога димензиите на стаклените елементи се ограничени поради производствениот процес.



Слика 2.16: Врска со стандардни завртки



Слика 2.17: Врска изведена завртки со плоснати глави

За да се конструира опишаната врска, најпрво се прават отвори во сите елементи од врската низ кои се вметнува завртката која ги пренесува силите низ врската со што се добива спој со преклоп.

Овие врски се користат за спојување на стаклен со стаклен елемент или пак поврзување на стаклен елемент со дополнителна подструктура без притоа да се користи спој со преклоп. Овој развиток резултира во употреба на **врски со завртки со плоснати глави** со кои се отстранува и секако испакнување над стаклената површина (слика 2.17).

При вертикално поставување на стаклените елементи, типичното потпирање во точка нема способност да прифати и пренесе големи оптоварување во рамнината на елементот освен оптоварувањето од сопствена тежина. Во вакви случаи се препорачува врска со завртки со плоснати глави.

Овој вид на врска многу често мора да прифати одреден степен на странично оптоварување на стаклениот панел. Геометриски ова за врската значи да овозможи одреден степен на ротација во спојот. Поради ова, новите видови на оваа врска во својата конструкција вклучуваат зглобен спој, познат како вештачка завртка кој овозможува слободна ротација на стаклениот панел.

Со цел да се овозможи лесна монтажа и да се избегнат непосакувани ограничувања во рамнината на стаклениот елемент (на пример од температура) потребно е завртките внимателно да се предзатегнати и фиксирани во отвори со поголеми димензии со соодветни посредувачки материјали со низок коефициент на триење (на пример тефлон).

Целта на секој вид на проектирана врска каде учествува елемент од стакло е да се намалат концентрациите на напони каде тоа е можно. Многу актуелни истражувања го потенцираат овој проблем. Overend и Maniatis се дел од истражувачите кои ги испитуваат влијанијата на различни параметри врз однесувањето на врската изведена со завртки за монолитичен (единечен) стаклен елемент и различни видови на посреднички материјали.

Еден важен параметар е односот помеѓу дебелината на завртката и големината на отворот. Овој однос е директно поврзан со напоните околу отворот. Поголем зазор води кон поголеми максимални напони во самиот отвор и може да предизвика промена на локацијата на максимални напони. Според истражувањата, споредено со врска без зазор, зголемување на зазорот на 2mm може да предизвика зголемување на максималниот главен напон во стаклениот елемент до 66% при употреба на алуминиум како посреднички материјал, односно 39% при примена на POM-C полимерен материјал.

Друг испитуван параметар е геометријата на стаклениот панел, поточно дебелината на панелот како и растојанието од работ на отворот до работ на стаклениот елемент кои влијаат на дистрибуцијата на напоните околу самиот отвор за завртката.

Помали дебелини на стаклениот елемент и помало растојание до работ резултираат во помал напречен пресек односно површина која се спротиставува на отповарувањето што е причина за појава на зголемување на напоните.

Видот на посредничкиот материјал е параметар кој директно влијае на магнитудата на максималниот затегачки напон кој се јавува околу отворот, меѓутоа ова влијание се минимизира кога во врската нема зазор помеѓу завртката и отворот во стаклениот елемент.

Повеќето истражувања кои се изведуваат на панели кои вклучуваат врски со завртки, оптоварувањата кои се аплицираат се најчесто оптоварувања во самата рамнина на панелот (Wellershoff et al., 2003a; Maniatis, 2005b; Mociböb et al., 2007; Petersen et al., 2009; Mociböb et al., 2010). Постојат многу малку истражувања каде оптоварувањето кое се аплицира е нормално на рамнината на панелот. Smith (1999) и Wurm (2007) се примери за истражувачи кои работеле на оваа проблематика. Smith испитува врска со асиметрични завртки кои се дел од надглавни елементи од стакло при што како оптоварување тој симулира оптоварување од снег и нормална компонента од оптоварување од ветер. Од друга страна Wurm развива стаклен покривен елемент кој содржи трапезест челичен лим поврзан за стаклениот панел преку завртки. Поради функцијата на покривен елемент оптоварувањето под кое е испитуван концептот е оптоварување нормално на површината на стаклениот панел.

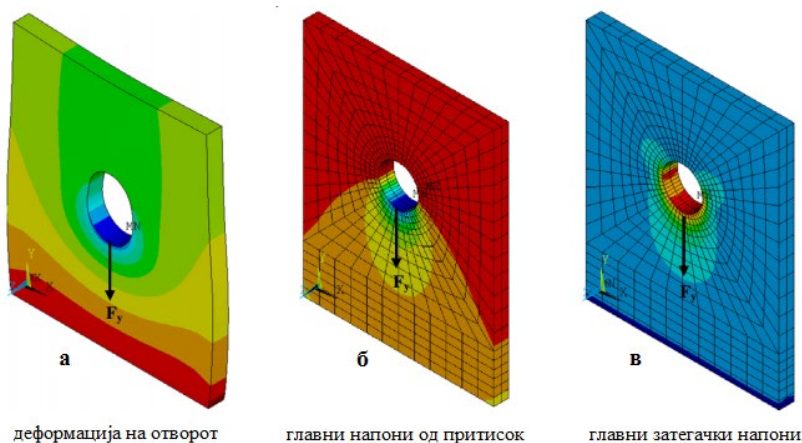
Од посебно значење претставува постоењето на отвор за завртките кои се користат кај раздвоивите врски како слабо место во стаклениот елемент. Промената на дистрибуцијата и големината на напонот околу отворот при преносот на надворешното оптоварување од елемент на елемент, може да влијае на појавата на концентрација на напон кои може да доведат до лом. Во продолжение, даден е краток осврт на овој проблем.

2.5. ВЛИЈАНИЕ НА ОТВОРИТЕ ВРЗ КОНЦЕНТРАЦИЈАТА НА НАПОНИТЕ

Главен предизвик при дизајнирањето на врските кај елементите од стакло е да се избегнат локални концентрации на напони и директен контакт помеѓу стаклениот и челичниот елемент. Ова е делумно решено со употреба на посреднички материјали кои имаат понизок модул на еластичност од стаклото. Во исто време овие материјали треба да имаат доволно висока јакост и тврдост за да ги пренесат оптоварувањата од еден на друг

елемент без притоа да се деформираат или да се истиснат од позицијата, а од друга страна да се доволно флексибилни за да овозможат редистрибуција на напоните. Дополнително, посредничките материјали треба да се отпорни на ползење и повторливи оптоварувања како и на UV зраци. Сите овие споменати карактеристики на посредничките материјали обезбедуваат одлична редистрибуција на напоните на притисок, меѓутоа имаат многу мало влијание на затегнувачките концентрирани напони кои се јавуваат поради елонгација на отворот за завртката.

Напонската состојба околу самиот отвор е директно зависна од видот на оптоварувањето кое делува во рамнината на елементот односно напрегањата кои се јавуваат. На сликата во продолжение (слика 2.18) дадени се прикази од нумеричка анализа на напонската состојба на отвор во стаклен панел под дејство на притисно оптоварување.

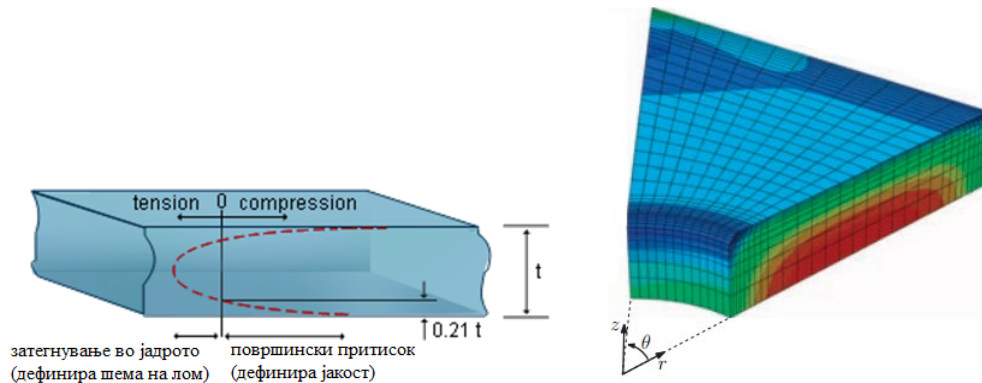


Слика 2.18: Нумерички модел на панел под дејство на притисно оптоварување

На приказот под а прикажана е деформираната форма на отворот во насока на дејството на оптоварувањето. На двата останати прикази, б и в соодветно, прикажани се главните напони на притисок и затегнување кои се јавуваат околу отворот на местото на допир на посредничкиот материјал со стаклото како резултат на деформирањето на отворот. Според истражувањето појавените напонски концентрации се присутни само во близина на отворот, а со оддалечување од него се јавува порамномерна дистрибуција на напоните.

Имајќи ја предвид специфичната напонска состојба на каленото стакло, постоењето на отвори е посебен проблем. Имено, отворите кај елементите од калено стакло се формираат пред извршување на термичкото зајакнување. Напонската состојба околу самиот отвор е иста како и по рабовите на калениот елемент [Jens Nielsen]. Специфичната зона на затегнувачки напони која се јавува по дебелината на калениот елемент завршува параболично кон работ на парчето односно отворот во елементот каде

владаат притисни напони што ја дефинираат јакоста на закалениот дел (слика 2.19). Оваа напонска состојба ја менува напонската распределба околу отворот на елементот и кај елементите од калено стакло мора да се обрне внимание при проектирањето на врските со завртки.



Слика 2.19: Напонска состојба по рабовите на елемент од калено стакло

Проблемите кои се јавуваат кај врските изведени со завртки во голем број случаи се решаваат со употреба на врски изведени со лепење. Како главна карактеристики на ваквите врски претставува избегнувањето на потреба од отвори во стаклениот елемент со што се избегнува појава на напонски концентрации. Предностите на овие врски се искористени и во склоп на ова истражување за формирање на хибридните модели и посебен осврт на карактеристиките на врските со лепење е дадено во наредната глава.

3. ХИБРИДНИ СТРУКТУРИ СО СТАКЛО

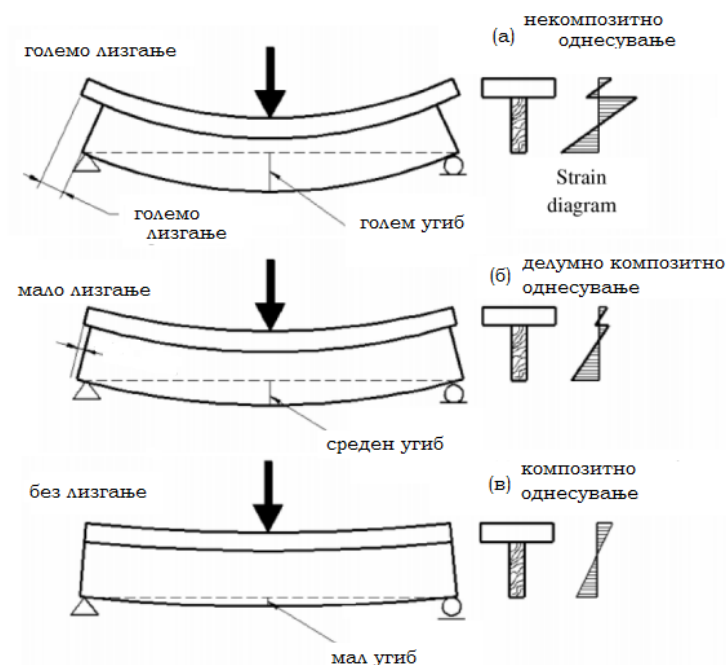
Во оваа глава опфатени се конструктивните форми во кои се сретнуваат елементите изведени од стакло, со посебен акцент на хибридните структури во кои стаклото е поврзано со елементи изработени од други видови на инженерски материјали. Овие нови хибридни структури ги претставуваат промените во употребата на стаклото кое добива одговорна функција како конструктивен елемент. Преку анализа на постоечките истражувања и изведени објекти, во главата претставени се гредни конструктивни елементи од стакло како дел од носечки конструкции, земајќи ги предвид нивните предности и недостатоци во употребата како и врските за нивно меѓусебно поврзување. Во продолжение на главата посебно внимание е ставено на сендвич и ламинирани хибридни елементи што претставуваат композитни форми од стакло кои преку својата специфична структура нудат подобрени механички карактеристики во однос на елементи изведени само од стакло. Овој тренд на подобрување на карактеристиките на стаклото резултира во промени и во видовите на врски кои се користат со цел зголемување на капацитетот на преостаната носивост по појава на лом на елементот од стакло, што е претставено во рамките на оваа глава.

3.1. ГРЕДНИ ЕЛЕМЕНТИ ОД СТАКЛО

Изгледот на една конструкција целосно зависи од геометриските и механичките карактеристики на конструктивниот материјал од кој е направена. Конструкцијата може да се опише во однос на три главни карактеристики: геометријата на конструктивните елементи, нивниот распоред и геометријата и видот на врските помеѓу овие елементи.

Големата носивост на притисок како особина на конструктивното стакло, овозможува употреба на елементи за врска изработени од материјал со поголема јакост и тврдост како што е челикот за поврзување на стаклените елементи. Врските со потпирање во точка предизвикуваат концентрација на напони што претставува најголем проблем за кртите материјали. Вакви врски се употребуваат за поврзување на елементите од стакло еден со друг или пак за подконструкција. Друг начин на поврзување на елементите е преку врски со потпирање во линија. Кај овие врски нападните сили се пренесуваат рамномерно во елементот со што се избегнуваат напонски концентрации.

Доколку еден плочест елемент е поставен на горната страна од носач и притоа се претпостави дека не постои триење во местото на контакт, под дејство на надворешно оптоварување овие два елемента ќе се спротистават на напрегањата поединечно (слика 3.1).



Слика 3.1: Композитно однесување на структура

Поради ваквиот одговор на елементите, се јавува деформација во вид на меѓусебно поместување во надолжен правец и голем угиб. Доколку, овие два елемента се поврзат со некаква врска, деформацијата од меѓусебното поместување може значително да се редуцира, а со тоа ќе се редуцираат и вертикалните деформации, угибот (слика 3.1 б и в).

Со други зборови, со воспоставување на врска помеѓу двата елемента, се зголемува заедничката јакост на свиткување. Колку новодобиениот елемент ќе се однесува како композит зависи од механичките карактеристики на врската со која се поврзани составните елементи на композитот. Врската која има крутост иста со крутоста на конституентите ќе даде елемент кој ќе има максимално дејство како композит. Меѓутоа, при користење на механички врски составени од завртки или врски со лепење, ова идеално дејство на елементот како композит неможе во целост да се постигне. Токму овој проблем претставува главен предизвик во конструктивното инженерство за дизајнирање на врска која во најголема мера ќе ја зголеми целокупната јакост на свиткување на композитот. На овој начин се зголемуваат можностите за користење различни форми и димензии при проектирање на конструкциите.

Елемент од стакло во вид на носач може да се користи како единечен елемент или да се комбинира преку наставување во повеќеделен носач или пак со мултиплицирање во носач со зајакнат напречен пресек (слика 3.2). За да се оствари ова често се користат пресеци познати од челичните носечки елементи. Главен проблем е затегнувачката зона каде се јавува потребата од зајакнување посебно при напрегања од свиткување. Многу често се сретнува зајакнување со челичен елемент во оваа зона на критични напони.



Слика 3.2: Наставување на носачи [Glass Structures]

Мултипицирањето пак како начин на зајакнување на пресекот опфаќа зголемување на пресекот преку ламинирање со повеќе слоеви од стаклен елемент. Кај линиските елементи носачи и столбови од стакло ова ламинирање се врши по оската нормална на правецот на дејство на оптоварувањето со што се всушност се зголемува отпорниот момент на пресекот по оската на свиткување.

Со користење на овој метод познатата Швајцарска фирма за производство на елементи од стакло Trösch го произведува носачот направен од стакло до должина од 21m. Носачот се состои од сегменти ламинарно поврзани по соодветна шема на начин што местата на наставување, кое се врши без дополнителни челични елементи, не го ослабуваат пресекот на носачот. Врската помеѓу елементите се врши целосно преку полимерниот материјал кој се користи во текот на ламинирањето и елементот функционира како композит во слоеви. Овој нов концепт е испитуван експериментално и преку нумеричка анализа при напрегање на свиткување со цел да се потврди модел на носач кој ќе може да биде употребуван како единечен елемент во конструкциите и при поголеми распони некарактеристични за познатите начини на употреба на носачи целосно изведени од стакло. [1]

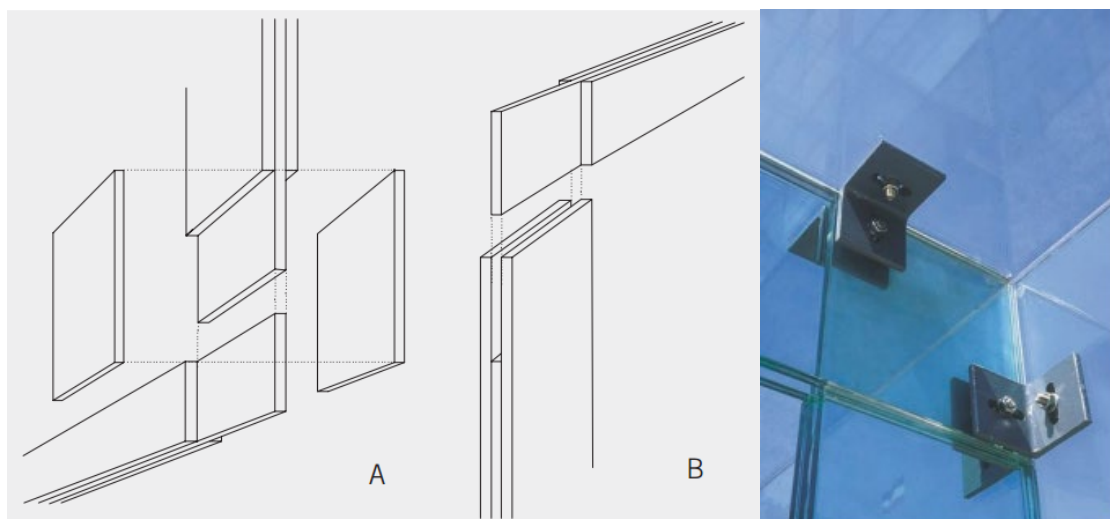
Различното поврзување на носачите и столбовите како елементи од конструкцијата резултира во конструкции отпорни на различни видови на оптоварувања. Во таа насока, со попречно поставување на носачите и столбовите еден во однос на друг како дел од покривна конструкција или фасада, дава конструкција која што пренесува оптоварувања по двете оски на поставување на елементите (слика 3.3).



Слика 3.3: Попречно поставување на носачите (кутиести модули)

За да може ова да функционира, крутоста на елементите мора да биде еднаква во двата правци. Поради тоа, во местото на вкрстување на носечките елементи мора да постои врска со завртки или со притисни плочи кои се способни за пренесување на моменти од свиткување. Вака добиените конструкции се статички неопределни и во моменти на лом на еден од носачите, оптоварувањето се распределува на соседните носачи кои мора да имаат соодветна напонска резерва за да ја надоместат носивоста на скршениот елемент. Формирањето на ваква конструкција може да се изведе и преку модули составени од четири носачи и плочест елемент кои поврзани помеѓу себе формираат еден вид кутии. Во овие модули носачите се напрегнати на притисок во горниот дел од нивниот пресек, а во зоната на затегнување зајакнати со вклучување на предзатегнати челични јажиња во структурата. Оптоварувањето на носачите делумно го превзема плочестиот елемент кој во исто време врши и стабилизација на носачите во модулот.

Повеќесегментното поврзување на носачите и столбовите може да се искористи и за добивање на рамки и сводови. Преку користење на соодветни врски може да се постигнат распони и до 12m. Со употреба на врски кои пренесуваат моменти може да се поврзуваат сегменти за формирање на конструкцијата. Кога во сегментите се вклучени ламинирани елементи како врска се користи преклопната како што е чест случај кај конструкциите од дрво (слика 3.4 А и В). Дополнително, за сигурно пренесување на моментите од свиткување може да се вклучат врски со завртки како зајакнување на преклопната врска.



Слика 3.4: Преклопна врска за поврзување на ламинирани сегменти

Носечките елементи од стакло опишани погоре најчесто се сретнуваат во вид на концепт на хибриден елемент. Ова се должи на потребата за зајакнување и зголемување на сигурноста кое во поголемиот број случаи се врши со вклучување на друг вид конструктивни материјали, како што е на пример челик, дрво, полимери зајакнати со стаклени влакна, бетон и сл.

Многу истражувања во моментот на тема хибридни конструкции од стакло се однесуваат на елементи кои се напрегнати на свиткување во однос на надолжната оска, користејќи го поголемиот опторен момент на пресекот.

Хибридни носачи од стакло и дрво се испитувани на Универзитетот во Лозана, Швајцарија EPFL од страна на Kreher [2], а потоа и во Универзитетот во Мињо, Португалија, од страна на Cruz и Requeno [3]. Носачите претставуваат елементи со I профил составен од фланши од дрво поврзани со конструктивно лепило со ребро направено од стакло (слика 3.5).



Слика 3.5: Носач изработен од стакло и дрво

Носачи пак добиени со комбинација на бетон и стакло како конструктивни материјали, се предложени и испитувани како концепт од страна на Freytag [4]. Врската помеѓу реброто изработено од стакло и фланшите изработени од бетон се изведува со вметнување на стаклениот дел во сеуште влажен (незатврднат) бетон. Носачот е испитувани под дејство на долготрајно оптоварување е истражувано и од страна на Veer et al. [5] кој претпоставува можна корозија на стаклениот елемент под дејство на големата алкалност на бетонот како материјал.

Хибридни стаклени носачи во кои во зоната на затегачки напони преку врска со лепење е поставена трака од полимер зајакнат со стаклени влакна (CFRP), е испитуван од страна на Palumbo [6] во Италија, а подоцна сличен концепт и од страна на Stefano Agneti [7]. Концептот е испитуван експериментално на должина од 1100mm и успешно инсталиран како елемент со должина од 6m во дел од кровна конструкција во Италија (слика 3.6).



Слика 3.6: Носач изработен од стакло и CFRP зајакнување

Најголемиот број на истражувања во областа на хибридни носачи се однесуваат на носачи изведени од стакло и челик. Пресекот на носачите се состои од стаклено ребро кое е поврзано преку врска со лепење за челичните фланши (слика 3.7).



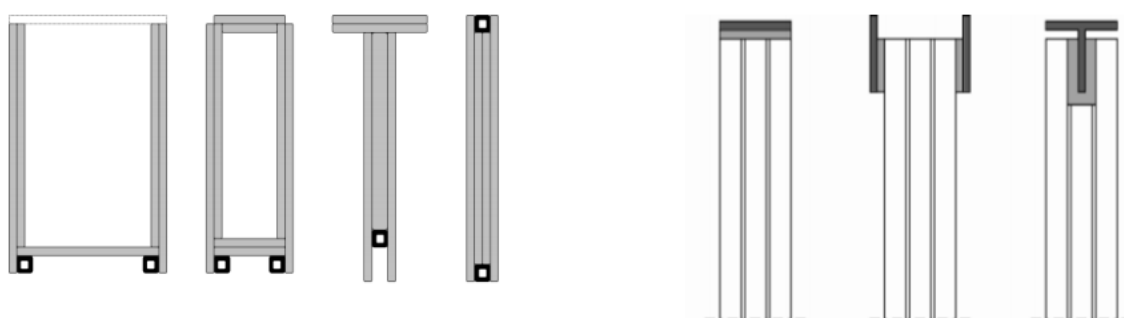
Слика 3.7: Носач изработен од стакло и челик

Wellershoff и Sedlacek испитуваат носачот од челик и стакло кај кој фланшите се поврзани преку врски со завртки за аголници кои понатаму се поврзани со конструктивно лепило со голема јакост на база на полиуретан за стакленото ребро [8].

Многу малку испитувања се направени за добивање на аналитички модел за механичкото однесување на концептите на хибридни носачи иако во последните години постојат обиди за добивање на ваквите модели. Netusil и Eliasova пробуваат да адаптираат

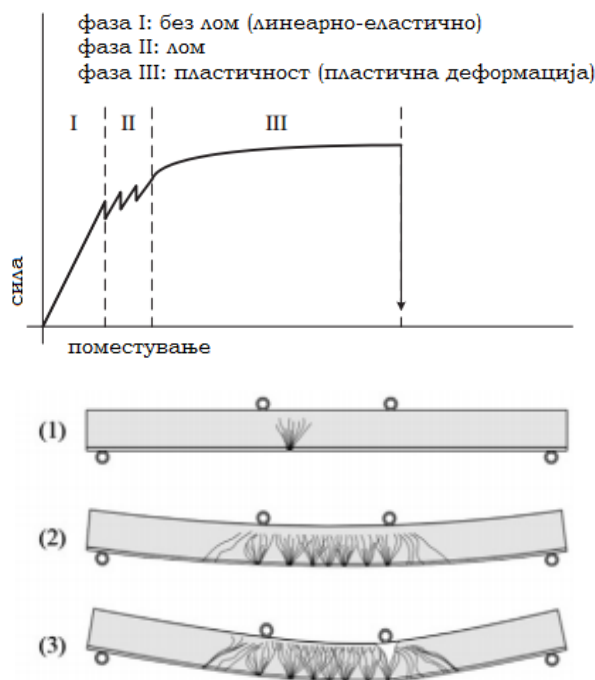
еден од аналитичките модели за пресметка на композитни сендвич структури за хибридни носачи од стакло и челик поврзани со лепење чиишто концепти ги испитуваат во своето истражување [9]. Ограничувањето во овој предложен модел е фактот што тој се базира на сет од вредности за модулот на лизгање на лепилото кое се користи и притоа не се зема предвид зависноста од времето. Дополнително овој модел не го предвидува однесувањето на носачот по појава на првиот лом.

Други истражувани концепти на хибридни носачи од стакло и челик се оние составени од стаклено ребро кое е зајакнато со тенка лента или челичен профил поврзан со лепење во зоната на затегнувачки напони на пресекоот (слика 3.8) [10][11][12].



Слика 3.8: Носач изработен од стакло и челик Louter (лево) и Weller (десно)

Она што е карактеристично за овие видови на носачи е нивниот капацитет на носење по појавата на првиот лом. Louter предлага концепт на ламинирано добиено ребро од стакло зајакнато со челичен профил во затегачката зона чиишто карактеристики ги испитува преку анализа на пренесувањето на ломот од еден во друг слој од стаклениот дел за да ја докаже и симулира преостанатата носивост на композитниот елемент и по појава на првиот лом (слика 3.9) [11].



Слика 3.9: Преостаната носивост по прв лом на хибриден носач Louter

3.2. ПЛОЧЕСТИ СТРУКТУРИ

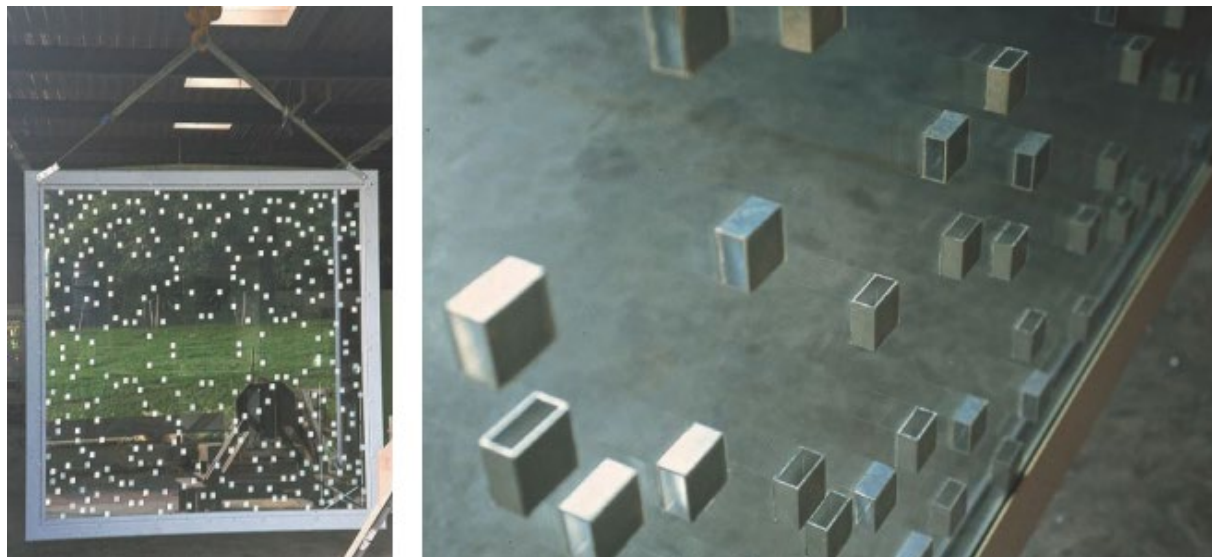
Панелите од стакло досега традиционално се користеле како терцијални елементи за затворање на конструкцијата (фасадни елементи). Нивните димензии во ваквата употреба се ограничени од деформациите кои настануваат при напрегање од свиткување и најчесто се многу помали од максималните понудени од производителите. Во последно време трендот на проектирање на конструкциите од стакло кој вклучува употреба на елементи со поголеми димензии со цел да се избегне изгледот на сегментација ги актуелизира **сендвич структурите** од стаклени елементи. Сендвич структурата подразбира употреба на повеќе слоеви за формирање на единечен елемент користејќи ја логиката на ламинираното стакло (слика 3.10). Ваквите структури се составени од минимум три слоја, надворешните слоеви и внатрешниот трет слој кој се нарекува јадро на структурата.

Со формирање на врска отпорна на смолкнување помеѓу поединечните слоеви се добива систем со поголема крутост од збирната крутост на сите членови поединечно. Напоните во структурата како и деформациите значително се намалуваат што се должи на сендвич ефектот. Овој ефект претставува пренесување на напоните од смолкнување помеѓу различните слоеви. Во многу несиметрични и хибридни сендвич структури слојот од стакло се поставува во зоната на напрегање од притисок, поради појавата на затегачки напрегања во долниот слој од структурата под дејство на моментот на свиткување .

Капацитетот на носивост на структурата директно зависи од јакоста на смолкнување на јадрото. Зависно од деформациите кои се јавуваат во јадрото, врската помеѓу слоевите може да се класифицира како еластична или како крута.

Крутоста и степенот на однесување како композит на сендвич структурата не зависат само од материјалот од кој е направено јадрото или од лепилата кои се користат за поврзување на елементите. Овие особини на структурата зависат од видот и времетраењето на оптоварувањето. Целосно поврзување со лепење може да се земе предвид доколку на структурата дејствува краткотрајно оптоварување, за разлика од случај на долготрајни константни оптоварувања, како на пример оптоварување од сопствена тежина, што може да придонесе до појава на ползење на употребените вискоеластични материјали, како што е лепилото, и да резултира во влијание врз однесувањето на елементот како композит. Дополнителен параметар кој мора да се земе предвид кај овие структури е и температурата на експлоатација, која исто така може да предизвика појава на ползење на слоевите од лепило. Заради ова, задржување на структурата во област на еластични деформации, овозможува намалување на напоните кои се јавуваат поради различниот капацитет на деформирање на поединечните слоеви од структурата, што е причина да се внимава на изборот на материјали со соодветни коефициенти на ширење при формирањето на сендвич структурата.

Првите концепти на сендвич структури во кои учествуваат елементи од стакло се предложените фасадни елементи прикажани на слика 3.10.



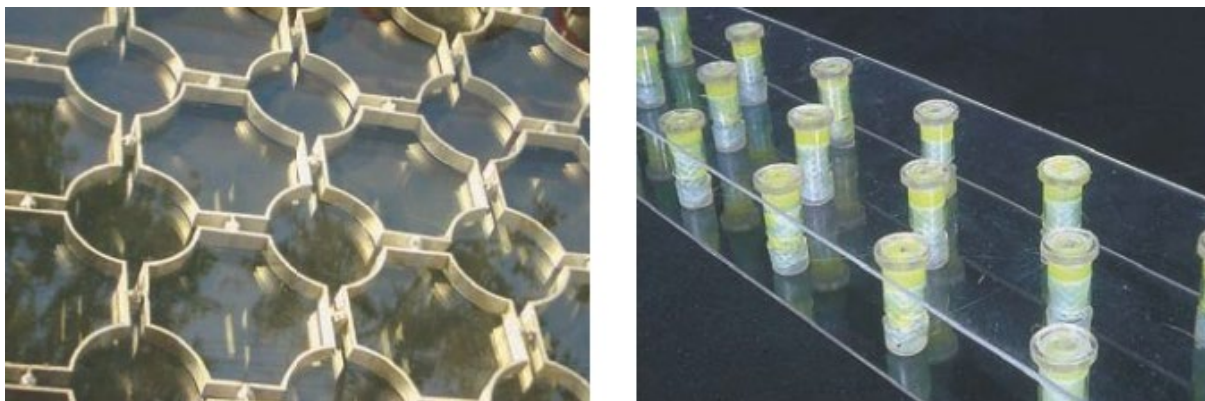
Слика 3.10: Сендвич структура за фасадни елементи

Во еден од прототиповите два плочести елементи од стакло се поврзани помеѓу себе преку алуминиумски шупливи профили поставени во два различни правци како јадро

на сендвич структурата. Алуминумските профили се поврзани со користење на конструктивно лепило.

Шемата на поставување на профилите е во зависност од дистрибуцијата на силата на смолкнување во самата структура, па затоа густината на поставување на профилите се зголемува во областа близу рабовите на стаклените елементи. Со други зборови, сегментирањето во слоеви кај хибридните сендвич структури во исто време претставува конструктивно и функционално зголемување на перформансите на панелот во целина.

Она што влијае на употребата на сендвич структурите во конструкциите од стакло е сложеноста на процесот на производство на истите, од технолошки и економски аспект, како и исполнување на условите од стандардите за квалитет при проектирање на вакви конструкции. Со варијација во начинот на производство, видовите на материјали кои се употребуваат и геометријата на слоевите кои се дел од структурата, се отвараат голем број на можности за начин на производство, функционирање и дизајнирање (слика 3.11).



Слика 3.11: Различни варијанти на јадра кај сендвич структури

При формирање на сендвич структурите изборот на материјал зависи пред се од функцијата на структурата во целокупната конструкција. Однесувањето на структурата како елемент од конструкцијата понатаму зависи од механичките карактеристики кои таа ги нуди како композит, а тие пак директно зависат од карактеристиките на материјалите од кои се направени слоевите. Најчесто употребуваниот материјал во комбинација со стаклените елементи е челикот и тоа во различни форми како слој или како јадро на сендвич структурата.

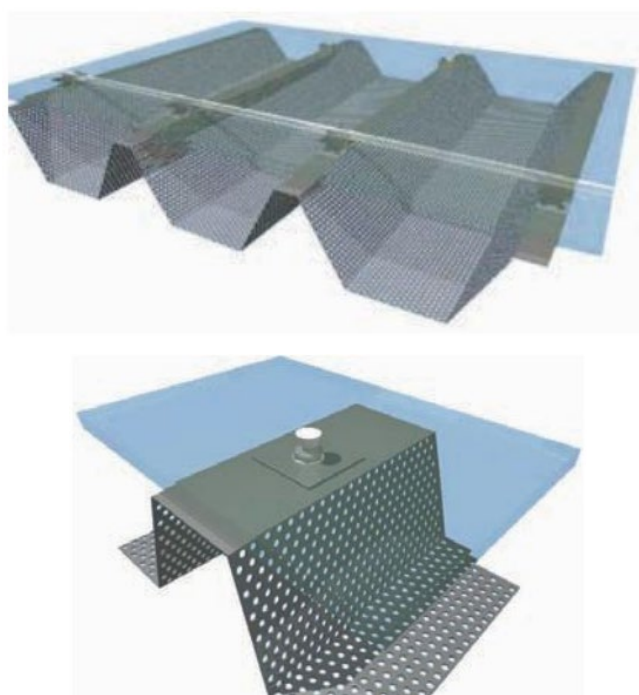
Пример за хибридна структура од стакло и челик е прототип на носечки покривен модул прикажан на слика 3.12. Во структурата е употребен стандарден трапезоиден челичен лим кој се употребува како покривен елемент при изградба на челични носечки конструкции кај индустриски објекти. Меѓутоа во ваквата употреба не се користи карактеристиката на пропуштање на светлината преку перфорациите кои ги содржи овој челичен елемент. Кога тој е искombиниран со транспарентен елемент се добива хибридна

конструкција која отвара визуелни, функционални и конструктивни можности и придобивки.



Слика 3.12: Прототип на носечка покривна конструкција

Сендвич структурата се состои од перфориран трапезоиден челичен лим поврзан преку механичка врска која пренесува смолкнувачки сили за покривен плочест елемент од стакло (слика 3.13). Стаклената плоча има за цел да ја ограничи горната страна на челичниот лим и да спречи појава на извивање на челичниот елемент.



Слика 3.13: Сендвич структура врски кај покривен модул

Начинот на кој е поставен елементот симулира го става истиот под напрегање од свиткување со што горната страна на структурата каде се наоѓа стаклениот елемент е под дејство на притисни сили додека долната страна претставува зона на затегнување.

Ограничувањата во димензиите на сендвич структурата се однесуваат само на можностите на производителот на стаклениот елемент, поради што може да се јави потреба од наставување на стаклените модули, што не се однесува на челичниот елемент. Ова наставување се изведува без проблем бидејќи силите на притисок се пренесуваат од еден на друг стаклен модул преку челно спојување на модулите.

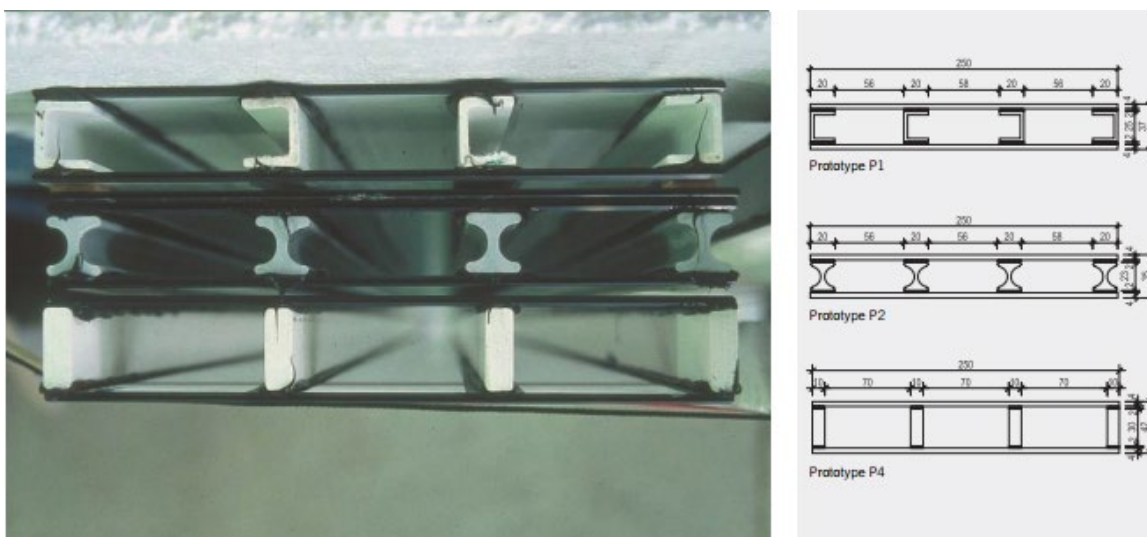
Иако се работи за модул кој е дел од покривна конструкција, самиот дизајн на конструкцијата овозможува употреба на единечен стаклен елемент. Ламинираниот стаклен елемент кој најчесто се користи од безбедносни причини кај покривните конструкции, на овој начин може да се избегне. Поврзувањето на стаклениот и челичниот елемент е изведен преку врски со триење кои користат завртки и притисни плочи помеѓу површината на панелот и горната фланша од профилот на лимот. Бидејќи кај поврзувањето со завртки посебно влијаат смолкнувачките сили, бројот на завртки кој се употребува при поврзувањето се зголемува во областите близу рабовите на стаклениот панел.

Капацитетот на носивоста на предложениот концепт на сендвич структурата двојно се зголемува кога истата функционира како композит. Ова се должи на фактот што разгледуван поединечно, челичниот елемент е дизајниран со цел да го има потребниот капацитет на носивост без да се земе предвид врска со стаклениот елемент, што може да доведе до зголемени деформации на елементот водејќи се според теоријата за композитно однесување, која тврди дека поголеми деформации се јавуваат кога нема композитно дејство помеѓу елементите, освен ако не функционира како композит спрегнат со стаклениот покривен елемент. Како дополнување на дејството на смолкнувачките сили при проектирањето на врските, мора да се земат предвид и издолжувањата кои настануваат во местото на спојување поради различниот капацитет на деформирање на стаклениот и челичниот елемент.

Што се однесува до подобрувања на механичките карактеристики на структурата, дополнителни зајакнувања од понови композитни материјали од типот на полимери зајакнати со стаклени влакна (GFRP) може да се воведат кои со мали дебелини ја зголемуваат јакоста на елементот. Во ваков случај поради блиските коефициенти на ширење, може да се оствари линеарно поврзување на деловите со помош на конструктивни лепила.

Друг пример за истражуван концепт на хибридна сендвич структура претставуваат прототип моделите испитувани од страна на Wellershoff кои всушност претставуваат IGUnits составени од два надворешни слоеви на стаклени панели и јадро кое покрај функцијата на зајакнувач има улога и на засенување (слика 3.14) [13].

Сендвич структурата се добива со поврзување на два стаклени елементи помеѓу кои паралелно се поставени профили изведени од пластика зајакната со стаклени влакна (GFRP). Ефективната крутост на добиениот композит се добива како резултат од напречниот пресек и крутоста на поединечните елементи. Силите на смолкнување се пренесуваат преку врските помеѓу фланшите на профилите од јадрото и површината на стаклените панели изведени со лепење.



Слика 3.14: Различни модели од предложениот концепт на Wellershoff

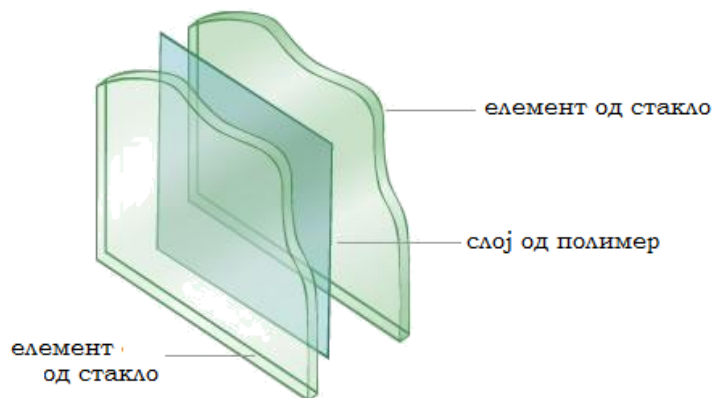
Перформансите на композитот зависат директно од крутоста на профилите и конструктивното лепило, дебелината на слојот од лепилото и меѓусебното растојание на кое се поставени профилите во јадрото. За дадено оптоварување намалувањето на големината на профилите, менување на модулот на лизгање на лепилото, дебелината на слојот на лепилото или бројот на профилите во јадрото резултира во зголемени напони во стаклените панели, а со тоа и зголемување на веројатноста за појава на лом.

Во текот на своето истражување, Wellershoff прави испитувања на влијанието на геометријата на профилите од јадрото врз перформансите на композитот. Освен различните профили кои се употребувани за јадрото останатите параметри во изработката на композитите не се менувани. Докажувањето и верифицирањето на теоретските претпоставки е направено преку стандардно тестирање на свиткување со потпирање во

четири точки. Според резултатите појавата на лом е во областа на најголем момент на свиткување во средината на панелите. Притоа, заклучено е дека за добиената деформација од $1/20$ од распонот на елементот не се појавува откажување во врските изведени со лепило. Сите испитани композитни модели покажале слична вредност за аксијалниот момент на инерција на пресекот на композитот. При употребата на профили во јадрото забележителен е капацитетот на носивост и по појава на првиот лом. По откажување на стаклениот елемент од зоната на затегнувачки напони, оптоварувањето го превзема останатиот дел од композитот кој функционира како стандардна врска помеѓу плоча и носач која ја задржува својата носивост на оптоварување што континуирано расте и при појава на поголеми угиби.

Барањето за засенување во концептот е решено преку промена на геометријата на профилите од јадрото во сендвич структурата. Употребата на Z – профили овозможува заштита и засенување од сончеви зраци кога сонцето е во највисоката точка на небото. Проверка на потребниот вид на профилот од јадрото се прави со симулирање на условите на осветлување односно условите на потребното засенување на внатрешноста. Компонентите од структурата може да се менуваат за конкретната намена и тоа преку промена на капацитетот на носивост, засенување или термичката изолација.

Од друга страна пак **ламинираните структури** претставуваат композити од плочести елементи меѓусебно поврзани преку слој од лепило. Ламинираните структури се познати и прилично употребувани во конструкциите од дрво, а во областа на конструкции од стакло се појавуваат со актуелизирање на ламинираното стакло како структура. Ламинираното стакло е составено од два или повеќе слоеви на стаклен елемент помеѓу кои се остварува врска со полимер (слика 3.15). Овој полимер на почетокот вообичаено е PVB (polyvinyl butyral) за подоцна да се појават различни видови на полимерен слој со зајакнати механички карактеристики, EVA, SentryGlass итн. Концептот на ламинирано стакло дава акцент на сигурноста на елементот поради капацитетот на преостаната носивост и по настанување на лом на еден од слоевите од стакло кој се добива со делување на полимерниот материјал за врска бидејќи ги задржува парчињата настанати од ломот со што не настанува инстантен колапс на целиот елемент.



Слика 3.15: Структура на ламинирано стакло

Овде посебна улога има полимерниот материјал и неговите карактеристики од кои всушност најмногу зависи механичкото однесување на целиот елемент. Земајќи предвид дека карактеристиките на полимерниот материјал директно зависат од времетраењето на оптоварувањето и температурата на експлоатација посебен фокус се става на испитувања на овој слој при испитување на ламинираното стакло како структура. Користење на предностите на ламинираната структура се користи кај формирањето на елементи целосно изведени од стакло, пред се носачи оптоварени по оската со поголем опторен момент на свиткување.

Во склоп на истражувањето од оваа теза се користи структурата на ламинирана конструкција со цел да се добие хибриден елемент со помала вкупна дебелина на пресекот, што не е случај кога се користи сендвич структура. Ова е директно поврзано и со вкупната маса на елементот која значително се намалува во однос на ламинирана структура добиена со елементи од стакло со исти димензии. Имено, ламинираното стакло има значително зголемена вкупна маса поради фактот што минимум два слоја од стакло се употребуваат за нејзино формирање што при проектирањето претставува значаен фактор.

3.3. ЗГОЛЕМУВАЊЕ НА КАПАЦИТЕТОТ НА ПРЕОСТАНАТА НОСИВОСТ

Обезбедување на капацитет на преостаната носивост кај елементите од стакло е од посебно значење во неговиот користење како носечки елемент во конструкциите. Според претходно изложеното, ова е основната мотивација за проектирање на хибридни

конструктивни елементи кои во себе содржат елемент со еластично – пластична карактеристика кој претставува зајакнување што го спречува моменталниот колапс по кршење на стаклото. Обиди за постигнување на оваа карактеристика постојат и кај проектирањето на врските помеѓу елементите од стакло.

Моменталната состојба во областа на врски кои се користат кај конструкциите кои вклучуваат елементи од стакло зема предвид врски кои најчесто се адаптација на претходно познати дизајни на врски кои се користат кај челичните и конструкциите од дрво. Како употребата на стакло во носечките конструкции станува поактуелна, така се јавува потреба за дизајнирање на нови соодветни врски и развивање на методи на дизајнирање. Целта на овие нови врски треба да биде фокусирана на:

- подобрување на носивоста на врските
- подобрување на капацитетот на преостаната носивост и по целосен лом на стаклото кое е дел од врската
- развој на нов систем на поврзување кој е посоодветен за кртото однесување на стаклото како материјал
- развој на врски кои овозможуваат флексибилност на конструкцијата и структурна толеранција, а со тоа зголемување на сигурноста и стабилноста на целокупната конструкција
- комбинирање на повеќе видови на врски со цел надоместување на недостатоците на едниот по цена на предностите на другиот вид на врска

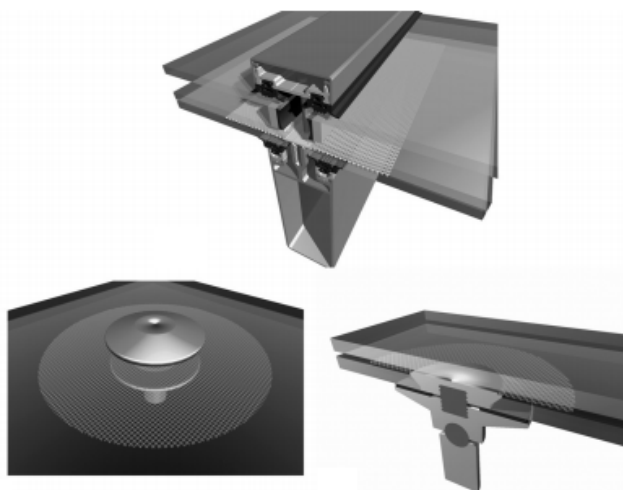
Имено, проблемите кои се јавуваат кај раздвоивите врски при спојувањето на елементите од стакло, дискутирани во претходната глава од оваа дисертација, се решаваат со вклучување на конструктивни лепила и дополнителни елементи во врската со што во исто време се делува и на капацитет на носење на врската и по појава на лом на стаклото.

Нов концепт за зголемување на капацитетот на преостаната носивост на ламиниран стаклен елемент кој се користи во надглавен дел од конструкција е вметнување на дополнителен материјал во слојот на ламинација (слика 3.16). Во истражувањата на Neugebauer [258] дадени се идеи за тоа каде и како може да се аплицира ова зајакнување во различни случаи на потпирање.

Во случај на поврзувањето во рамка зајакнувањето се додава во слојот на ламинација близу рабовите на елементот при што зајакнувачкиот слој е делумно извлечен од работ на стаклениот елемент. Извлечениот дел се зацврстува во пластична гранична рамка или се заварува за метален профил кој е врзан за подструктурата од конструкцијата. Во случај на лом на ламинираниот стаклен елемент, додадениот зајакнувачки слој го спречува извлекувањето на стаклениот елемент од својата рамка. Овој концепт е посебно

пригоден за употреба во надглавни конструкции каде треба да се елиминира можноста од испаѓање на стаклените елементи.

Зајакнувачкиот слој може да се вметне и како превенција од целосно одвојување на стаклениот елемент потпрен во точка во надглавни конструкции при појава на целосен лом. Во овој концепт зајакнувачкиот слој во вид на кружна плоча се додава во ламинирачкиот слој точно во областа околу отворот за завртки. Зајакнувањето се постигнува со врзување на овој слој за елементот за врска. Во случај кога се користат завртки со рамна глава, конусниот отвор се прави само во еден слој од ламинираниот стаклен елемент. Тогаш зајакнувачкиот слој се поврзува на рамниот дел од елементот за врска со заварување и ова се прави пред самиот процес на ламинација.

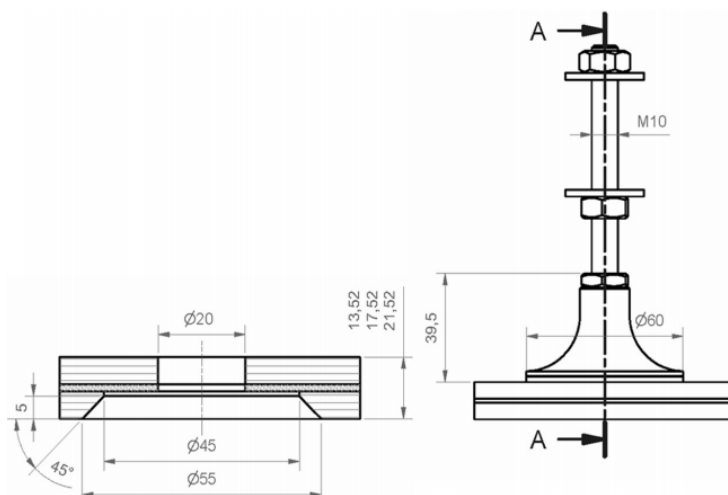


Слика 3.16: Зголемување на носивоста на врската со вметнување на дополнителен материјал во ламинацијата

Воведување на нови геометриски форми кај врсните изведени со завртки со рамни глави може да го зголемат капацитетот на преостаната носивост на конструкцијата. Кога се користат елементи од стакло, овој капацитет зависи од видот на врската за поврзување во точка. Поради малата површина на контакт помеѓу завртката и елементот од стакло постои можност за извлекување на овој елемент од врската и појава на целосен лом. Еден од начините да се реши овој проблем е користење на стандардни завртки каде испакнатата глава на завртката нуди поголема површина на допир со стаклениот елемент. Меѓутоа, ваквиот дизајн на врска се избегнува пред се поради архитектонските естетски барања.

Сепак постои можно решение во врската со завртки со рамни глави т.н „SCS“ кои на прв поглед делуваат многу налик стандардните завртки со рамни глави. Овој вид на завртка има специфична конструкција (слика 3.17), а главната разлика од стандардната врска се состои во геометријата на отворот за завртката кој овозможува дизајн без

испакнатости и во исто време отвор низ целата дебелина на ламинираниот стаклен елемент за зачувување на носивоста на елементот. Во овој случај посебно треба да се внимава ламинирачкиот слој да стигнува до работ на отворот при што истиот ќе може да се поврзе со горната стаклена единица и во областа на врската. Овој дизајн овозможува соодветен капацитетот на преостаната носивост и по лом на стаклениот елемент.



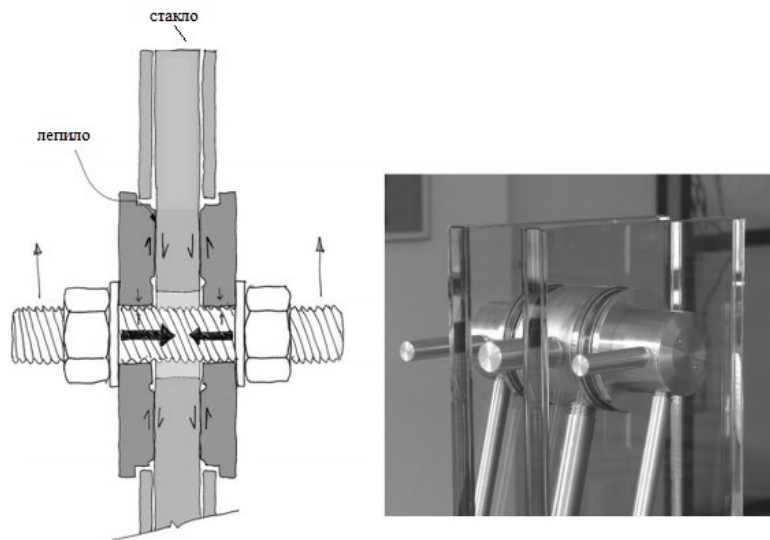
Слика 3.17: Зголемување на носивоста на врската со нови геометриски форми

И покрај големата практична употреба на врските со завртки, тие не претставуваат најдобар избор кога станува збор за поврзување на елементи од стакло. Стаклото е крт материјал што не овозможува редукција на напонските концентрации околу завртката. Поради ова врските со завртки се неефикасни од конструктивен аспект. Од друга страна, поради грешките кои настануваат на површината на стаклениот елемент при правење на отворот за завртките, како и менувањето на напонската состојба од калење околу самите отвори, врските со завртки предизвикуваат највисоки напонски концентрации.

Актуелни истражувања на Overend ја анализираат јакоста на врски метал – стакло изведени со лепење чијашто главна цел е да се избегне потребата од отвори во стаклениот панел [14]. Истражувањето изведено на конкретна врска зема предвид три различни употребени видови на лепила. Лепилото кое покажало најдобри перформанси е акрилно лепило со прилично висока носивост. Во истото истражување за споредба направени се испитувања на врска изведена со завртки помеѓу истите елементи при што носивоста која се постигнала е три пати помала од концептот кој вклучува чисто спојување со лепење. Заклучоците од истражувањето потврдуваат дека со соодветна подготовка на површината и избор на видот на лепило, може да се постигне врска која ќе има зголемена јакост при краткотрајно оптоварување од 300% во споредба со истата изведена со завртки.

Понатамошен развој на овој концепт претставува врска која е комбинација на лепило и предзатегната завртка (слика 3.18). Овој вид на врска се состои од две кружни

плочи од нерѓосувачки челик кои се директно врзани со лепило за двете страни од целосно кален стаклен панел. Челичните дискови се меѓусебно поврзани со предзатегнати завртки со навртки од двете страни, кои поминуваат низ отвор во стаклениот панел. Поради ваквата конструкција, завртките всушност не се врзани за стаклениот елемент туку за челичните плочи. Отворот за завртката се изведува така што има капацитет да ги исполни толеранциите дефинирани од производителот на стаклениот панел и да овозможи можност за делумно свиткување на завртката.



Слика 3.18: Комбинирање на раздвоивите врски и врските со лепило

Слојот од лепило во исто време претставува и посреднички материјал кој го спречува директниот контакт на металниот елемент и стаклената површина и треба да ги пренесе смолкнувачките сили помеѓу нив. Овој слој кој има многу мала дебелина (0,1 mm), гарантира крута и врска отпорна на ползење. За да се овозможи предзатегнатата врска стаклениот панел кој учествува во врската мора да биде единечен. Во случаи кога се користи ламиниран стаклен елемент, челичните плочи треба да бидат поврзани за само една стаклена единица, онаа која е заштитена од надворешни влијанија и удари.

Користењето на врски изведени со лепило не секогаш гарантираат рамномерна дистрибуција на напоните и целосно избегнување на напонските концентрации. Рамномерното нанесување на слојот од лепило односно постигнување на конзистентна дебелина не секогаш е возможно, поради што се јавуваат ексцентрицитети во врските со металните елементи што понатаму резултира во ексцентрично оптоварување на врската што значи и појава на напонски концентрации.

За формирање на моделите од истражувањето од докторската дисертација се користи врска изведена со лепење и тоа по површина. Вака најчесто се формира структурата на ламинирано стакло каде врската се остварува со помош на полимер.

Принципот на функционирање на ваква структура и предностите на врските со лепење се дел од предложените концепти.

4. ПЛОЧЕСТИ ЕЛЕМЕНТИ ЗАЈАКНАТИ СО ЧЕЛИЧЕН ЛИМ

Со оваа глава се опфатени хибридни плочести елементи од стакло и нивната структура кои претставуваат основа за предложените конструктивни елементи, предмет на ова истражување. Во главата анализирани се веќе изведени концепти кои покажуваат дека традиционалниот пристап при дизајнирање на врските помеѓу стаклените елементи и останатите елементи во конструкцијата подразбира избегнување на директен контакт на стаклениот елемент и останати цврсти материјали односно пренасочување на оптоварувањата или движењата подалеку од стаклениот елемент, а се со цел подобрување на механичките карактеристики и добивање на композитно однесување на елементот. На овој начин се актуелизира употребата на спојување со лепење, со што се елиминираат голем број недостатоци на механичките (раздвоивите) врски за спојување на стаклото поради што во оваа глава е даден осврт на функционирањето и карактеристиките на ваквиот вид на врски. На база на она што е веќе истражувано во областа на хибридните конструкции од стакло, дизајниран е новиот концепт на хибриден елемент составен од стакло и челик, како зајакнувачки материјал, што е предмет на истражување во дисертацијата. Основната идеја и целта на предложениот концепт се објаснети во рамките на оваа глава. На крајот од главата презентира се пристапот за добивање на специфичните перфорации и карактеристики на зајакнувачкиот слој преку користење на параметричко моделирање и анализа со методот на конечни елементи.

4.1. КОНЦЕПТ НА ЗАЈАКНАТ ПЛОЧЕСТ ЕЛЕМЕНТ

На база на анализираните изведени концепти на хибридни структури во чиј состав има стакло, формиран е предлог за ново конструктивно решение на хибриден елемент кој може да се употребува како носечки во една конструкција. Хибридниот модел претставува функционална комбинација на челик со стакло, кој ги користи позитивните карактеристики на двата материјали во единствен елемент со подобрени механички својства и јакосни карактеристики.

Моделот од перфориран челичен лим и стакло вклучува иновативен инженерски пристап за решавање на актуелни проблеми во модерните конструкции и во исто време бара мултидисциплинарен пристап од конструктивен и архитектонски аспект. Според тоа, со новиот дизајн се предлага елемент кој кој во себе делумно ќе ја содржи функцијата на челичната носечка конструкција која постои во позадина во многу од случаите на употреба на стаклото во објектите, а истовремено ќе го исполни и критериумот на функционалноста во користењето од аспект на оптимална распределба на светлината во просторот.

Користењето на лепилата е актуелно во дизајнот на конструкциите и врските пред сè во одговорни функции и неговата употреба во овој модел ја има истата улога. Досегашното лепење во точка (point fixing) во овој модел се проширува на лепењето по површина. Иако самото спојување и лепилата не се дел од истражувачките цели, преку експерименталниот дел од ова испитување индиректно ќе се испита и можноста на употреба на лепилата во вакво конструктивно решение од споени нееднородни материјали. Неговата важност произлегува од фактот што најголемо влијание на пренесувањето на напоните од еден во друг дел од конструктивниот елемент го има врската што во овој случај е токму лепилото.

Функционалноста во концептот лежи во едноставноста на дизајнот и технолошките потреби за производство. Од друга страна, физичките карактеристики на

модулите во конкретната употреба претставуваат предност, но и параметар кој може да се менува. Функционалноста во концептот лежи во едноставноста на дизајнот и технолошките потреби за производство. Од друга страна, физичките карактеристики на модулите во конкретната употреба претставуваат предност, но и параметар кој може да се менува. Влијанието на дебелината на стаклото при проектирањето на хибридните плочи, како и влијанието на типот на перфорацијата на челичниот лим се главните конструктивни параметри кои може да предизвикаат значителна промена на однесувањето на панелите. Затоа една од целите на истражувањето е детално да се проучат овие влијанија преку нумерички модели верифицирани со експериментални истражувања.

Трендовите во дизајнирањето на фасадните стаклени елементи се насочени кон користење на мултифункционални елементи. Главниот акцент се става на добивање добри механички карактеристики при помала вкупна маса на елементот и ниска цена, а од друга страна можност за регулирање на транспарентноста. Концептот кој е испитуван нуди решение кое во исто време ги исполнува двете поставени барања. Перфорацијата на зајакнувачкиот елемент овозможува транспарентност која е важен фактор кај конструкциите од стакло. Степенот на транспарентност може да се менува со менување на видот и големината на перфорациите. Овој ефект комбиниран со ефектот на искривување на светлината кај некои калени елементи од стакло, може да дадат различни варијации во осветлувањето на внатрешниот простор и соодветно засенување. Меѓутоа, перфорацијата на елементот во предложениот концепт освен што не ја компромитира транспарентноста на целокупната структура, туку игра важна улога во промената на јакосните карактеристики и механичкото однесување на елементот. Имено, преку уникатна распореденост на формите на перфорирање може директно да се делува на напонската распределба во стаклото и тоа во критичната зона на затегање.

Со цел да се разбере функционирањето на хибридниот елемент чиишто елементи се поврзани преку спојување со лепење, во продолжение анализирани се врските со лепење кои се користат при употребата на елементи од стакло и нивните карактеристики.

4.2. ВРСКИ ИЗВЕДЕНИ СО ЛЕПЕЊЕ

Спојувањето со лепење е позната алтернативна техника за спојување која успешно се користи во одредени области од инженерството како што се авионската и автомобилската индустрија. Меѓутоа, во конструктивното инженерство при дизајнирање и проектирање на конструкциите оваа техника сеуште активно се истражува. Посебно внимание се посветува на технологијата на лепење кај конструкциите од стакло бидејќи проблемот на појава на концентрации на напони, што е слабост на кртите материјали, може да се избегне со употреба на лепење како техника на спојување. Најголемата предност на врските добиени на овој начин е рамномерната дистрибуција на напоните преку спојот со лепило. Поради рамните и мазни површини кои ги поседуваат стаклените елементи, при изведување на врска со лепење се избегнува потребата од дополнителна обработка и подготовка на површината што претставува уште една предност на ваквите врски.

Генерално, постојат два типа на лепила кои се користат кај конструкциите од стакло:

- меки и еластични врски (изведени со лепила на база на силикон)
- крути врски со лепење (изведени со акрилни лепила или лепила на база на епоксидна смола)

Лепилата претставуваат полимерни материјали кои се составени од мономерни меѓусебно поврзани во вериги кои формираат макромолекули. Атомите во макромолекулите се хемиски врзани, а макромолекулите се хемиски и физички поврзани една со друга и зависно од видот на овие врски може да се јави и испреплетување што влијае понатаму на нивните карактеристики и отпорност при надворешно оптоварување.

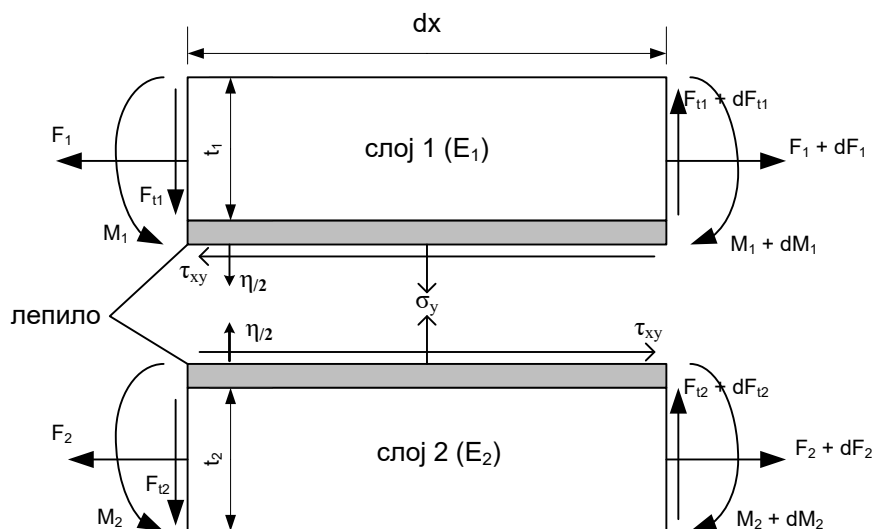
Полимерите како материјали се делат на различни видови зависно од нивните термомеханички карактеристики кои зависат од молекуларната структура на полимерот. Лепилата на база на силикон и едно компонентниот полиуретан се примери за типични еластомери. Додека пак дво компонентниот полиуретан спаѓа во групата на термостабилни со карактеристична молекуларна структура на попречно поврзани молекули.

4.2.1. МЕХАНИЧКО ОДНЕСУВАЊЕ НА ВРСКАТЕ СО ЛЕПИЛО

Механичкото однесување на врските изведени со лепење е тешко да се предвиди поради нелинеарните карактеристики на полимерните конструктивни лепила кои зависат од времетраењето на оптоварувањето и температурата на експлоатација. Во вакви

услови јавуваат зголемени пластични деформации и намалување на јакоста. Од многуте предложени методи за пресметка на напонската состојба кај преклопна врска добиена со лепење, само неколку ги земаат во предвид трите параметри кои се карактеристични кај врските помеѓу челик и лепило: смолкнувањето кое се јавува по должината на преклопот, нелиенарноста на материјалот и асиметричноста на пресекот на врската поради различни видови адхеренти.

Goland и Reissner [50], предлагаат емпириско пресметување на дистрибуција на моментот, каде моментот на свиткување со кој е оптоварена преклопната врска се пренесува на адхерентите (предметите кои се поврзуваат) и лепилото во зависност од нивната релативна крутост со воведување фактор за моментот на свиткување k_b . Со предложениот метод се добиваат експлицитни решенија за две гранични состојби, една во која деформацијата на врската се добива преку деформацијата на лепилото (во тој случај факторот k_b тежи кон нула и индицира релативно флексибилно лепило) и другата состојба кога деформацијата на врската е предизвикана еднакво од деформацијата на лепилото и адхерентите (факторот k_b тежи кон еден, што индицира релативно круто лепило).



Слика 4.1: Дел од преклопна врска добиена со лепење со димензија dx

Во истите методи добиени се изрази за оптоварувањата кај една симетрична преклопна врска со лепење (слика 4.1) како функции од нормалниот напон на затегнување σ_y и тангенцијалниот напон на смолкнување τ_{xy} кои се јавуваат во лепилото, односно:

$$\frac{\tau_{xy}}{p} \frac{d}{2t} = \frac{\tau_{xy} b d}{2F} = -\frac{1}{8} \left[\frac{\beta c}{t} (1 + 3k_b) \left(\frac{\cosh \frac{\beta d}{t} \cdot \frac{x}{d}}{\sinh \frac{\beta d}{2t}} \right) + 3(1 - k_b) \right] \quad (4.1)$$

$$\text{каде што: } \beta^2 = 8 \frac{G_c}{E} \frac{t}{\eta} \text{ и } k_b = \frac{2M}{pt^2}$$

G_c е модулот на лизгање на лепилото,

k_b е фактор на дистрибуција на моментот на свиткување,

d е должина на преклопната врска,

b е ширина на врската во насока на z -оска,

t претставува точка на интерес по должината на врската,

p е напонот на затегнување кој се добива под дејство на силата на оптоварување F

Сепак претставениот метод има недостатоци, односно, не го зема предвид нелинеарното однесување на полимерните лепила и е ограничен на симетрични преклопни врски каде улествуваат слични адхеренти.

Во методот предложен од Hart-Smith [51], во пресметката се вклучува односот од моментите на свиткување добиени кај асиметрични пресеци M_1/M_2 , и се земаат предвид еласто-пластичните карактеристики на лепилото.

Најзабележителни промени во анализата на врските со лепење има во методот предложен од Bigwood и Crocombe [52], каде се добива општ линеарно еластичен модел за предвидување на дистрибуцијата на напонот на смолкнување во преклопна врска, вклучувајќи ја и онаа каде адхерентите се разликуваат помеѓу себе. Моделот се базира на диференцијална равенка од седми ред (4.2) која го одредува тангенцијалниот напон на смолкнување τ_{xy} и диференцијална равенка од шести ред (4.3) за пресметка на нормалниот напон σ_y по должината на врската.

$$\frac{d^7 \tau_{xy}}{dx^7} - K_1 \frac{d^5 \tau_{xy}}{dx^5} + K_3 \frac{d^3 \tau_{xy}}{dx^3} - K_5 \frac{d \tau_{xy}}{dx} = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{d^6 \sigma_y}{dx^6} - K_1 \frac{d^4 \sigma_y}{dx^4} + K_3 \frac{d^2 \sigma_y}{dx^2} - K_5 \sigma_y = 0 \quad (4.3)$$

каде, коефициентите K_1 до K_5 претставуваат константи кои зависат од модулот на лизгање на лепилото и модулот на еластичност на адхерентите.

Во услови на долготрајно оптоварување каде се посебно важни нелинарните карактеристики на лепилото, овој метод не може да се употреби бидејќи не ги зема во предвид овие карактеристики. Дополнително, за решавање на изразите според методот, потребно е да се дефинираат граничните услови на краевите од преклопната врска, а во пропратниот модел не е дадено решение за нивно дефинирање.

Проблемите кои се јавуваат кај аналитичките методи предизвикуваат активни истражувања во областа на нумеричко моделирање и анализа на врските добиени со лепила со цел да се изврши проверка и пресметка на напонската состојба во врската. Како и да е, досегашните нумерички анализи тежнеат кон добивање на поедноставни модели за дефинирање на лепилото кое е дел од врската и зависно од граничните услови и оптоварувања вклучуваат или не вискоеластични модели за материјалот и нелинеарно однесување на полимерните конструктивни лепила. Условите на испитување на врската кај моделите од ова истражување опфаќаат еластично однесување на лепилото бидејќи се работи за краткотрајно оптоварување.

4.2.2. ПАРАМЕТРИ КОИ ВЛИЈААТ НА ПЕРФОРМАНСИТЕ НА ВРСКИТЕ СО ЛЕПЕЊЕ

Постојат многу параметри кои треба да се земат предвид при дизајнирање на врска со лепење. Различни услови може да се земат предвид при изборот на соодветно лепило: хемиска компатибилност, геометрија на површините кои се спојуваат односно слојот од лепило, температурите на експлоатација на спојот, трајноста на врската, како и технологијата на нанесување на лепилото и негово зајакнување (сушење).

Најважниот услов кој треба да се земе предвид при дизајнирање на врска изведена со лепење е геометријата на спојот. Пред се, ова се однесува на дебелината на слојот од лепило. Во оваа фаза на дизајнирањето мора да се направи разлика помеѓу лепило кое се користи како директен контакт на елементите или како лепило за врска со пополнување на отвори (поврзување на елементите во рамки). При употреба на првиот вид на лепило, потребната дебелина е помала од 1 mm, додека при вториот вид на употреба лепилото ги дава целосните перформанси при дебелини на слојот поголеми од 5 mm. Кога во врската

учествува стаклен елемент кој е термички обработен потребно е да се земат предвид дополнителни монтажни толеранции поради изгледот на термички третирани стаклени елементи чијашто површина станува брановидна, а не идеално рамна. Кога овие толеранции надминуваат вредност од 1 mm се препорачува да се користи лепило на база на смола кои имаат способност да се употребуваат при врски со пополнување на отвори. Во случај на помали толеранции може да се користат и акрилни лепила.

Лепилата кои зацврстуваат под дејство на UV светлина, се користат активно во индустријата за мебел каде се изведуваат производи од стакло и каде на овој начин се постигнуваат функционални споеви. Меѓутоа, проблем се јавува кога слојот има поголема дебелина бидејќи светлината не успева да стигне до сите мономерни и да ја активира полимеризацијата по цела дебелина. Од друга страна, овие лепила имаат можност за користење во конструкции од стакло поради фактот што откако ќе зацврснат, стануваат отпорни на влијанието на UV радијација.

Друг аспект кој треба да се земе предвид при дизајнирањето на врска со лепење и избор на соодветно лепило е температурниот опсег во кој врска ќе биде експлоатирана. Ова е важен податок поради критичната температура на избраното лепило која всушност претставува преодна температура при која се менуваат целосно механичките карактеристики на полмерот поради задвижување на макромолекулите во структурата. Доколку температурата на експлоатација ја надмине критичната доаѓа до намалување на крутоста и јакоста на лепилото. Температури под критичната, го спречуваат задвижувањето на макромолекулите и на тој начин го елиминираат овој проблем. Вредноста на критичната температура зависи од видот на структурата и меѓусебните врски на молекуларните вериги. Епоксидните смоли имаат повисока критична температура од акрилните лепила и затоа генерално се препорачуваат за употреба при повисоки експлоатациони температури. Од критичната температура зависи однесувањето на лепилото и при краткотрајни и при долготрајни оптоварувања. Како резултат на ова силата која може да ја издржи врска е помала кога температурите на делување се приближуваат кон вредноста на критичната температура, а вискозната компонента од деформациите се зголемува. Кога се постигнува вредноста на критичната температура, промените во особините на лепилото не настануваат инстантно туку постепено [4]. Дополнително, адхезионите сили се намалуваат при повисоки температури, па истото лепило може да постигне кохезионен лом при пониски температури односно адхезионен лом при повисоки температури [43]. Со оглед на тоа дека во истражувањето од оваа дисертација како релевантни параметри во анализата на концептите земени се геометриските карактеристики на елементите кои се употребуваат, температурниот опсег на експлоатација не претставува фактор, и е земен како константна вредност.

Површината на стаклениот елемент е друг параметар кој мора да се земе предвид при избор на лепило. Зависно од типот на лепилото површината има или нема потреба од дополнителна подготвка со цел зголемување на адхезивната моќ на лепилото и добивање на врска со поголема јакост. Најчесто употребувани средства за подготовка на површината се прајмери чијшто вид и неопходност зависат од видот на достапно лепило.

Последен аспект кој треба да се земе предвид при дизајнирањето на овој тип на врски е трајноста на лепилото. Постои недостаток на информации и истражени факти за однесувањето на лепилата на подолги периоди поради што во моментот се користат препораки од искуството добиено со употреба на лепила при спојување на метални делови. Влијанието на експлоатациониот период врз перформансите на лепилото зависи од хемиската структура на лепилото и врските помеѓу молекуларните вериги. Механичките карактеристики на слојот од лепило кои директно зависат од дебелината на слојот како и контактната површина лепило – адхерент, може да се влошат доколку во периодот на експлоатација спојот доаѓа во контакт со вода во форма на течност или влага. Влијанието на вода и влага е најчесто реверзибилно, односно карактеристиките повторно се подобруваат откако ќе настане сушење. Други параметри кои влијаат на трајноста на лепилото се температурата, големината на напоните и нивната распределеност во самиот слој од лепил, како и карактеристиките на површините кои се спојуваат. Со цел да се испитаат сите претходно наведени параметри кои влијаат на трајноста односно стареењето на лепилото, најчесто се прават тестови на епрувети направени од лепилото кое се испитува како и на целосни врски изведено со конкретното лепило.

4.3 ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ОБЛИКОТ И ФОРМАТА НА ПЕРФОРАЦИЈАТА СО ПОМОШ НА ПАРАМЕТАРСКО МОДЕЛИРАЊЕ

Концептот на хибридниот елемент е формиран во ламинирана несиметрична структура каде во слоеви се поставени стаклениот елемент и перфориран челичен плочест елемент меѓусебно поврзани со конструктивно лепило.

Идејата на употреба на зајакнување во вид на перфориран челичен елемент не се базира само на задржувањето на транспарентноста на стаклениот елемент, туку и на можностите со конкретен облик и распоред на перфорацијата на зајакнувачкиот елемент

директно се влијае на големината и распределбата на напоните во стаклениот елемент. За определување на најсоодветната форма и распореденост на перфорацијата, се користат предностите на параметричкото моделирање. Начинот како да се постигне мултидисциплинарност во пристапот се состои во комбинирање на различни софтверски алатки кои како резултат треба да ја дадат најсоодветната форма на перфорираниот челичен елемент.

Ова беше направено на почетокот на истражувањето кога за добивање на концептите на хибридниот елемент беа искористени два софтверски пакети, за јакосна пресметка на елементот и за параметричко моделирање и добивање на формите на перфорација на зајакнувачкиот слој. Целта на овој дел од истражувањето беше испитување на можностите за добивање на соодветна форма на перфорација на база на почетната идеја која понатаму со соодветна доработка на принципот на добивање може да претставува начин за добивање на оригинални и секогаш различни идејни решенија кои ќе имаат не само на естетски туку и на инженерски основи.

Параметричкото моделирање е нов начин на генерирање на проектански решенија преку алгоритамски пристап и начин на размислување. Тоа претставува проектирање и дизајнирање на параметриски 3Д модели преку поставување на атрибути (својства) и правила кои взаемно поврзани во математички алгоритам, софтверот ги продуцира како излезно решение. Влезните податоци можат да бидат фиксни, непроменливи или да варираат. Варијаблите се нарекуваат уште и параметри, а нивна манипулација и промена може да произведе бесконечен број на решенија на зададениот проблем. Параметрискиот 3Д модел одговара на промените на дизајнираниот код преку адаптација и реконфигурација на новите вредности на параметрите без бришење и прецртување на самиот модел. Со тоа се отвара можност за лесно експериментирање и согледување на проблемите во процесот на компјутерско моделирање и симулација.

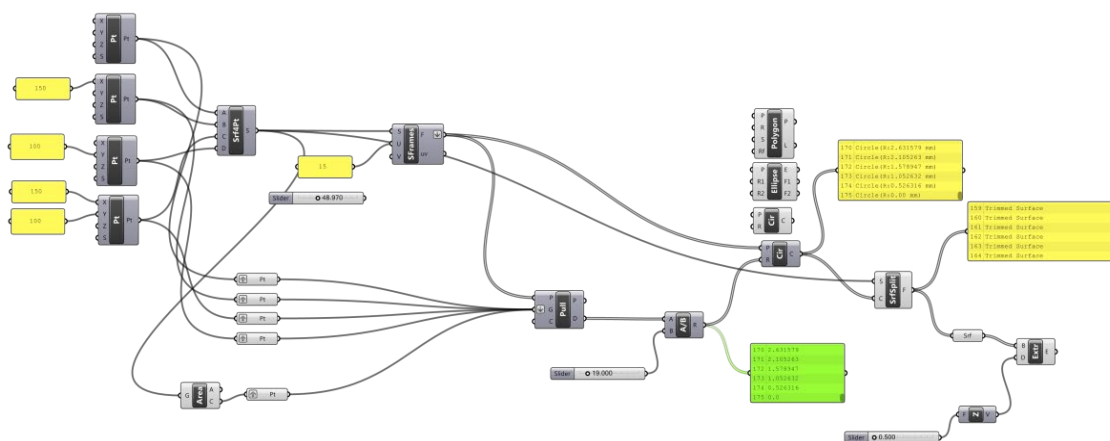
При параметриското обликување параметрите и врските помеѓу нив се оние кои ја дефинираат формата на 3Д моделот. Ваквиот пристап бара сосема нов начин на размислување со претходно поставување на правила при дефинирање на софистицирани геометриски структури како дел од комплексни решенија. При тоа потребно е јасно поставување на променливите со цел за детерминирање на видот на трансформација кој би ја претрпел моделот. Компјутерските програми и алатки ни овозможуваат и следење на целиот процес на генерирање, претставување на целата историска еволуција на моделот, со тоа и лесен пристап до деловите на кодот кои би сакале да ги промениме. Овие промени би биле проследени преку претходно детерминирани правила и врски што помага при

реконструкција на моделот со смена на параметрите во било кој дел од процесот на создавање на моделот. Преку оваа постапка параметрискиот модел би се преконфигурирал и адаптирал на промените на параметрите или јасно би ни ги воочил проблемите при создавање на комплексни решенија со можности за понатамошни солуции.

Како алатка за изработување на перфорацијата на металниот слој од предложените концепти во дисертацијата, а со тоа и испитување на можноста за негова конкретна употреба и апликација во архитектонски проекти е искористен софтвер кој претставува предетерминирана, графички осмислена платформа за лесна употреба на алгоритамско едитирање. Формирањето на алгоритмот опфаќа геометриски елементи и математички функции како влезни и излезни информации за прилагодување на посебните делови кои при тоа влијаат на промена на целиот систем.

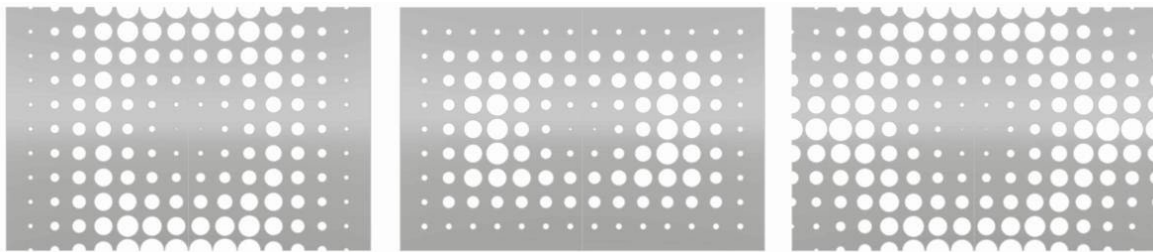
Како појдовен и детерминиран параметар е земена димензијата на панелот. Перфорацијата која треба да се формира поседува специфична транспарентност која нуди и засенување во внатрешниот простор. Со лесна адаптација и промена на претходно наведените параметри, употребата на хибридниот елемент добива поширока примена и може да се адаптира на програмските барања и визуелната естетика на објектите.

Во првата фаза од параметриското генерирање на перфорација на металниот слој се земени различни гранични услови за моделот, начинот на потпирање на самиот панел и тоа во 4 точки, 2 или 4 страни но претставени се геометриски, без никаква вистинска анализа на оптоварувањата и реакционите сили. При тоа како излезен резултат од дефинираниот алгоритам (слика 4.2) се согледува формирањето на отворите преку нивната големина и геометрија.

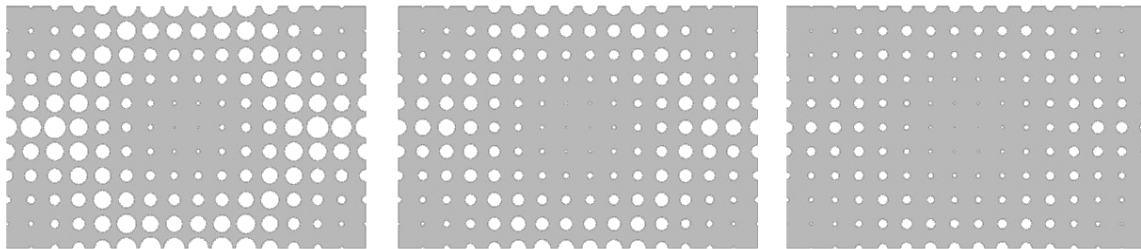


Слика 4.2: Grasshopper како алатка за параметриско генерирање на формите на перфорација

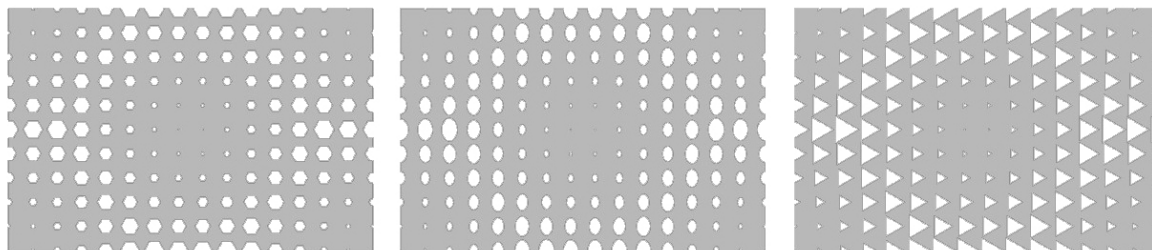
Во оваа фаза се добиени низа на можни решенија добиени преку менување на геометријата на отворите, нивната распореденост и големина. Чекорите на формирање на првиот код почнуваат со детерминирање на основните точки кои ја одредуваат димензијата на панелот, поврзани помеѓу себе создаваат површина сегментирана на повеќе делови, а секоја средна точка на посебните делови претставува и точка на радиус на било која од дадените геометрии кои ја одредуваат перфорацијата. Распореденоста на отворите зависи од оддалеченоста на нивните радиуси од двете страни кои само геометриски симулираат страни на потпирање, од 4 страни како и од четирите крајни точки. На сликите 4.3, 4.4 и 4.5 во продолжение, визуелно се претставени сите промени во концептите со промена на конкретни параметри:



Слика 4.3: Елементи добиени при промена на начинот на потпирање: 2 страни, 4 страни и 4 точки



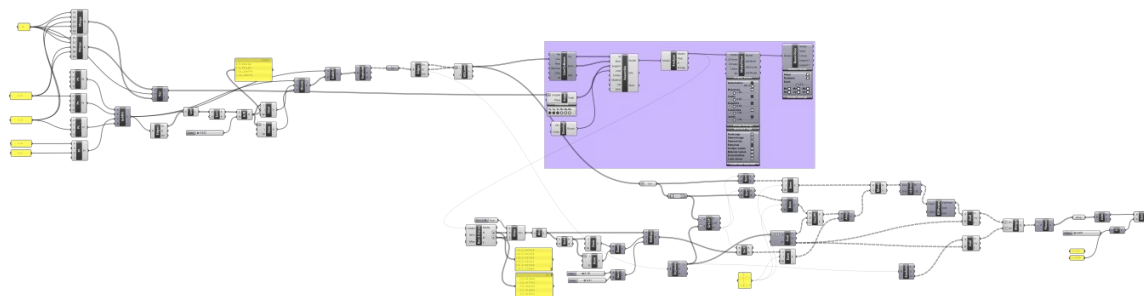
Слика 4.4: Експериментирање преку големината на отвори



Слика 4.5: Експериментирање со геометрија на отворите на перфорацијата

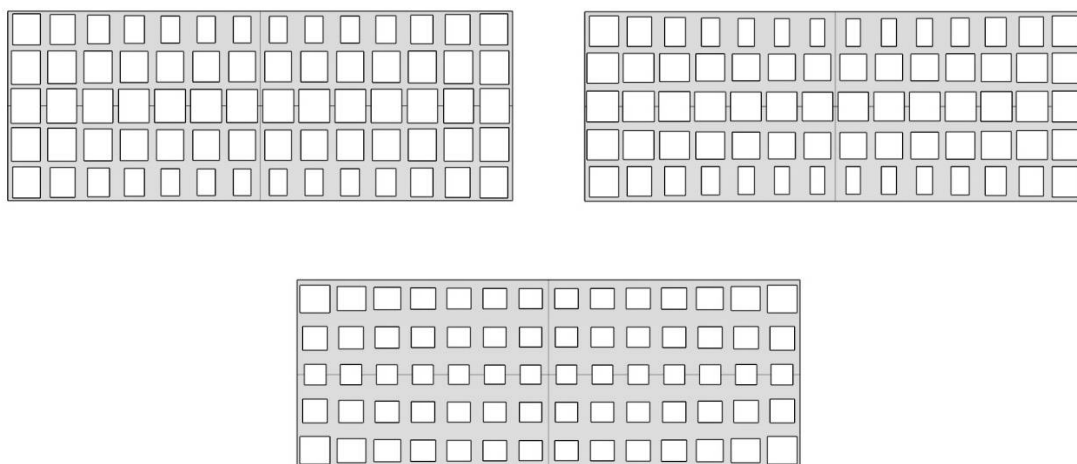
Во втората фаза на моделирањето како додатна алатка е употребен дополнителен модул Karamba кој овозможува додавање на информации за конечни елементи на

геометриско генерираните форми во Grasshopper, со што самиот модел проаѓа низ процес на структурна анализа. Добиениот алгоритам кој ги вклучува промените е прикажан на слика 4.6.



Слика 4.6: Алгоритам добиен во втората фаза на моделирањето (Karamba)

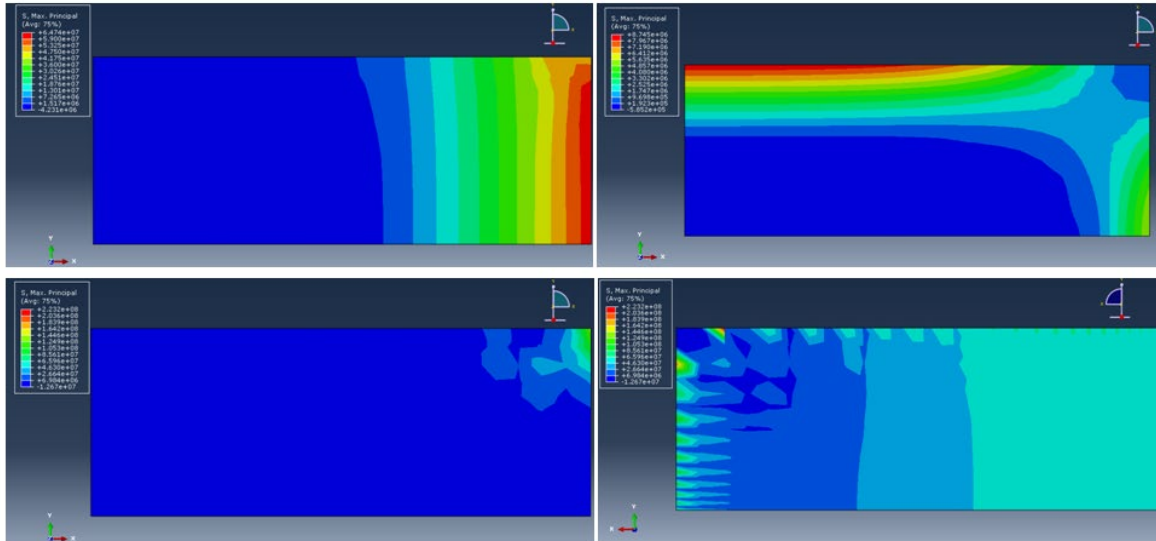
Во втората фаза се добиваат модели кои зависат од начинот на потпирање како основен параметар кои ја детерминираат геометријата на отворите, посебно нивната распореденост. Тие понатаму се зависни од врските со најголемата аксијална сила, како и најголемиот момент на оптоварување на самиот панел преку низа математички врски на зависност. Резултатот е прилично крута перфорација на панелите, со правоаголна геометрија на отворите и без многу можности за манипулација (слика 4.7).



Слика 4.7: Различни видови на перфорација добиени во втората фаза од моделирањето

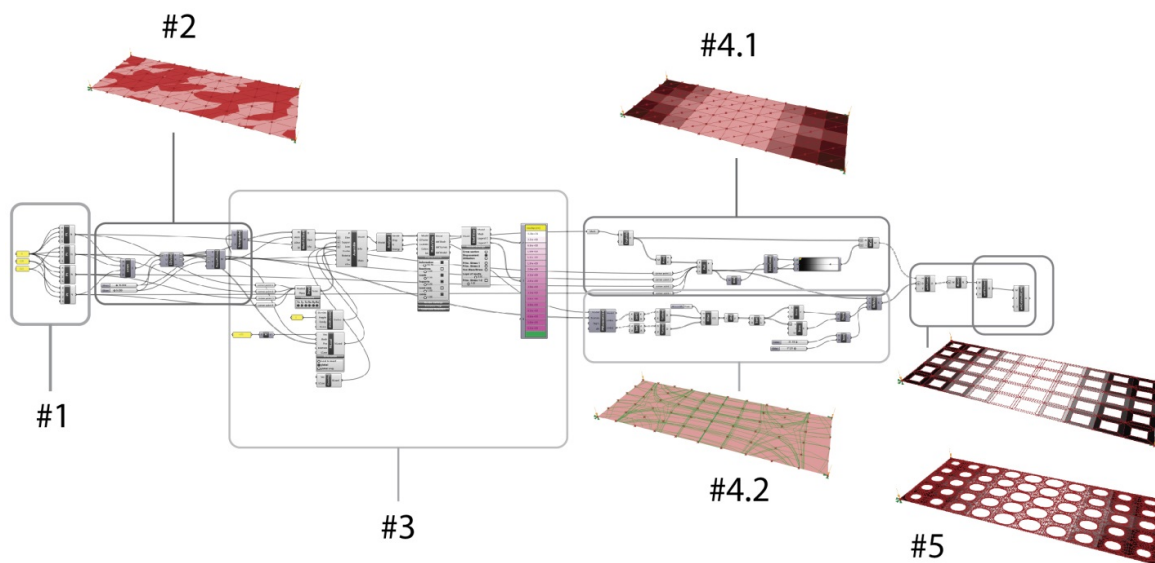
Со понатамошна подлабока разработка на кодот со цел за изнаоѓање поприфатливи архитектоснки решенија и разновидност на крајните модели, за поширока употреба и имплементација на самиот панел. Во оваа фаза, концептот на параметриското моделирање на перфорациите на челичниот лим беше поврзан со нумеричката анализа на

стаклен елемент со истите димензии изведена во софтверскиот пакет Abaqus која се базира на анализа со конечни елементи. Резултатите добиени од оваа нумеричка анализа беа вклучени како влезни параметри во математичкиот алгоритам од параметриското моделирање (слика 4.8).



Слика 4.8: Напонска распределба во стаклен елемент добиена при различни видови на потпирање (Abaqus)
 потпирање во две точки (горе лево), потпирање по четири рабови (горе десно),
 потпирање во четири точки зона на притисок (доле лево), потпирање во четири точки зона на затегање
 (доле десно)

Во продолжение дадени се чекорите на подобрување на алгоритамскиот код за добивање на формите (слика 4.9).



Слика 4.9: Подобрување по сегменти на алгоритмот за формирање на перфорацијата

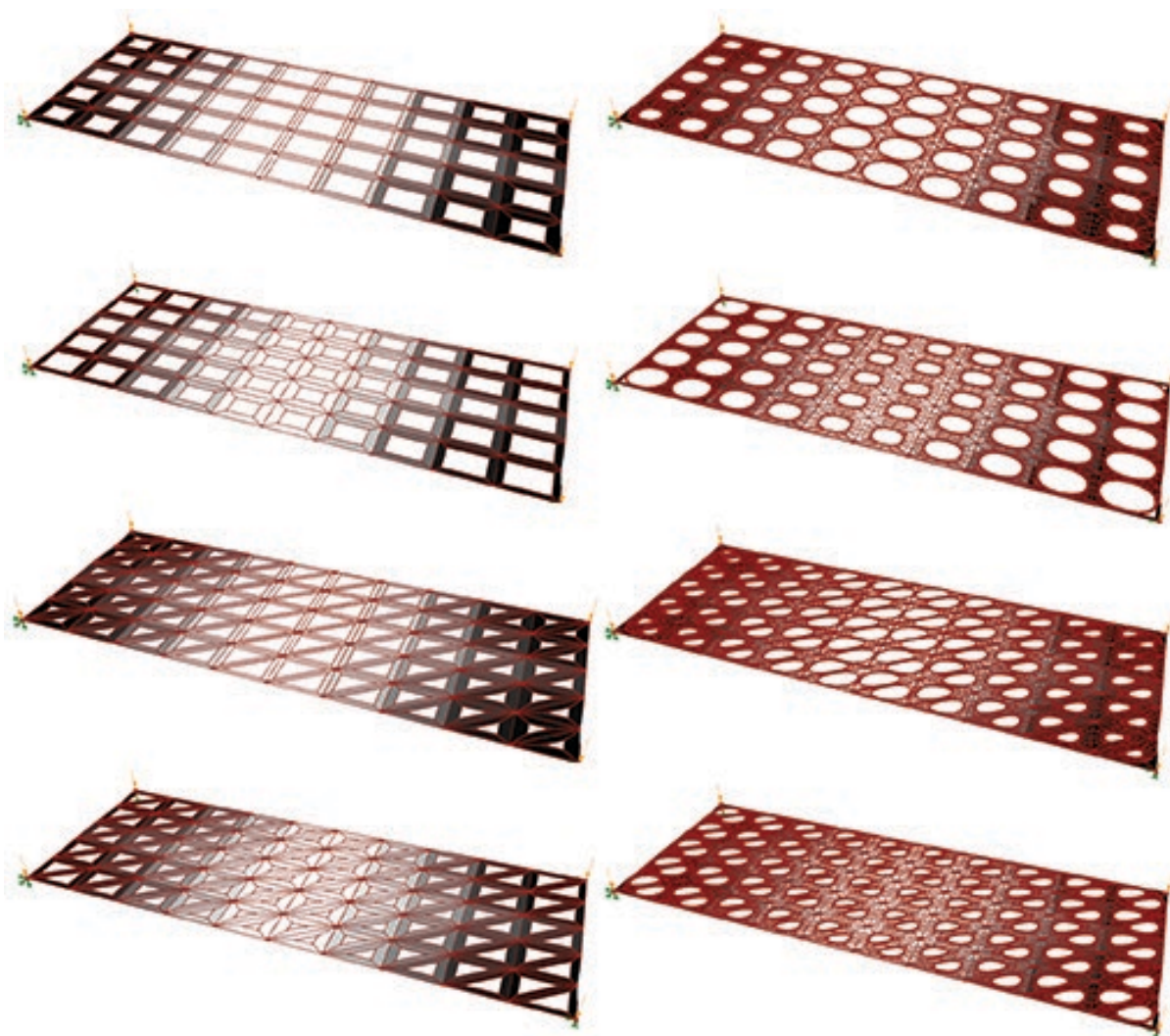
1. Како прва позната и непроменлива компонента е димензијата на самиот панел, иако во самиот код таа може да се промени, параметар кој може да се менува и притоа да се добијат и бесконечно многу големини на панелот, што претставува и една од основните предности на овој начин на параметриско моделирање.
2. За полесна анализа, површината се разделува на помали делови- во дадениот пример на 50, но и нивниот број исто така може лесно да се зголеми и намали со цел да се добијат поголем или помал број на отвори при перфорација на панелот.
3. Се дефинираат механичките параметри како начинот на потпирање на панелот на две или четири страни како и на четири точки, напонската состојба, реакционите сили и моменти и видот на материјалот.
4. Добиените податоци преку математички функции и правила на поврзаност ги одредуваат местата на перфорација и тоа преку параметарот кој ни го означува начинот на потпирање, како и големината на отворите кои резултираат од вредностите на распоредување на напоните на површината.
5. Во последниот сегмент од алгоритмот се поставува геометријата на отворите која може да се манипулира. При тоа кодот генерира бесконечно многу решенија директно поврзани со механичките карактеристики на металниот слој за зацврстување на стаклото (слика 4.10).

Добиените геометрии понатаму се користат за формирање на хибридни модели кои се испитани во софтверскиот пакет Abaqus. Целта на ваквото моделирање и анализа на предложените концепти е испитување на можноста за потврда на концептите преку

комбинирана нумеричка анализа за добивање на хибридни модели кои преку специфично добиената перфорација ќе дадат променета напонска состојба во стаклениот елемент, што всушност претставува главната мотивација на докторската дисертација.

Она што се добива како резултат на овој дел од нумеричкото истражување се хибридни модели кои по направената анализа со конечни елементи имаат променета дистрибуција на главните напони во стаклениот елемент и делумно намалување во магнитудата на истите (слика 4.11). Оваа промена посебно се забележува при гранични услови на потпирање во четири точки на моделот, каде според легендата и контурата на деформираните модели се забележува намалена концентрација на напоните околу местата на потпирање.

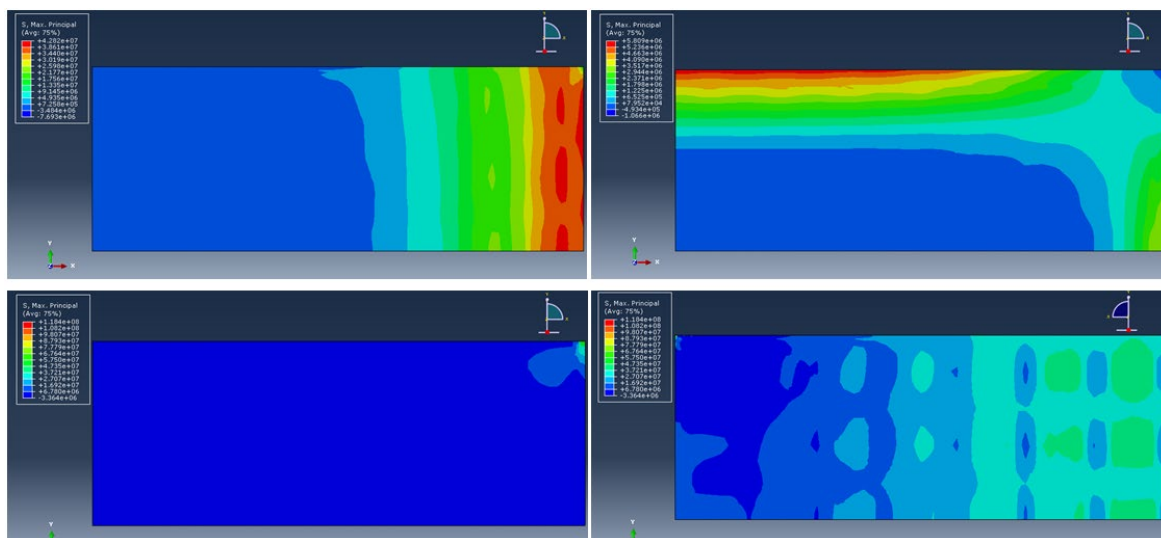
Сепак, заклучоците од оваа анализа појавуваат недостатоци и потреба од дополнително усовршување на моделот и деталите на поврзување на двата употребувани софтверски пакети со цел добивање на модели кои уште пореално ќе ја прикажат и предвидат напонската состојба на хибридниот модел, што претставува дел од препораките за понатамошните испитување на темата.



Слика 4.10: Резултантни геометрии на перфорираниот слој

Освен механичките карактеристики на моделот, како влезни параметри при создавање на алгоритамскиот код за параметриска анализа дополнително како фактор може да се вклучи и транспарентноста односно засенувањето кои се важни практични параметри за употреба на предложениот концепт.

Конечно, како верификација на оваа комбинација при нумеричкото моделирање може да се употребат експерименталните истражувања на конкретни решенија за перфорациите на металниот слој и да се утврди точното влијание на овој параметар врз механичките карактеристики на хибридниот модел кој се добива како резултат



Слика 4.11: Евалуација на напонската состојба на хибридниот елемент (Abaqus)

потпирање во две точки (горе лево), потпирање по четири рабови (горе десно),

потпирање во четири точки зона на притисок (доле лево), потпирање во четири точки зона на затегање (доле десно)

По направените први обиди за добивање на формите на перфорираниот зајакнувачки слој преку употреба на нумеричко моделирање, направен е избор на перфорација за хибридните модели испитувани во тезата со цел експериментално определување на механичките карактеристики на формируваниот хибриден елемент и валоризирање на зајакнувањето кое може да се добие на овој начин како и определување на влијанието на повеќе параметри во однос на капацитетот на зајакнување.

За да може да се добијат резултати споредливи меѓу себе, избраната перфорација е еднолична без промена на големините на формите во еден ист модел. Со цел да се одреди влијанието на големината на формите на перфорација испитувани се две различни големини на отворите. Експерименталните испитувања со сите детали на анализираниите модели се даде во понатамошниот дел од тезата.

5. АНАЛИТИЧКО ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИОНАТА СОСТОЈБА СО ПРИМЕНА НА МЕТОДОТ НА КОНЕЧНИ ЕЛЕМЕНТИ

Определувањето на јакосните карактеристики и механичкото однесување на елементи од стакло и хибридни елементи во кои учествува стаклото, подразбира комбиниран пристап на анализа каде најчесто покрај нумеричкиот метод за анализа се вклучува и експерименталното испитување за верификација на резултатите. Ова пред сè се должи на непостоењето на стандарди за пресметка на ваквите елементи, кои би опфатиле соодветни аналитички методи за добивање на карактеристиките на самите елементи.

Оваа глава се однесува на аналитичкото определување на напонско-деформационата состојба на конструктивни елементи од аспект на примена на методот на конечни елементи (МКЕ). Преку основните равенки на линеарната теорија на еластичност во матричен облик, што претставува најпогодна форма за формулација на методот на конечни елементи, и теоријата на свиткување на плочи, направено е теоретско дефинирање на проблемот кој е предмет на истажувањето. Со оглед на природата на проблемот и структурата на хибридните елементи, оваа теорија е разгледана и при појава на големи деформации, како и свиткување на ламинирани структури. Во продолжение, како дел од методот на конечни елементи, дадени се основните равенки со кои се дефинираат расположливите типови на елементи за опишување на рамнинска и просторна напонско-деформациона состојба, како и проблемите кои може да настанат при нивна употреба за моделирање на свиткување.

5.1. ОСНОВНИ РАВЕНКИ НА ЛИНЕАРНАТА ТЕОРИЈА НА ЕЛАСТИЧНОСТ

Одредувањето на механичкото однесување на носечки елементите од стакло претставува голем предизвик во конструктивното инженерство пред се поради сеуште недефинираните методи кои може да се користат во различни услови на експлоатација, а кои во себе ќе ги содржат сите карактеристики на овие елементи. Ова посебно се однесува на елементите од стакло кои подлежат на термичка обработка и како резултат на истата добиваат специфична напонска состојба во внатрешноста на структурата. Покрај термичкото зајакнување, деформабилноста на стаклениот елемент се менува и со употреба на механичко зајакнување преку ламинирање. Во тие случаи одредувањето на напрегањата и деформациите на елементот под конкретно оптоварување е од голема важност за задржување на интегритетот на елементот во конструкцијата каде се употребува.

Со оглед на тоа што анализата на елементите во оваа дисертација се заснова на методот на конечни елементи во продолжение даден е осврт на основните равенки на теоријата на еластичност и зависностите помеѓу деформациите и напоните кај елемент со мали димензии претставени во матричен облик со цел да се разбере примената на овој аналитички метод.

Доколку се разгледа еден елемент кој е надворешно оптоварен од површинско оптоварување p и концентрирани сили F , компонентите од оптоварувањето може да се прикажат во правец на трите оски од Декартовиот координатен систем и тоа како:

$$p^T = [p_x \quad p_y \quad p_z], \text{ и } F^T = [F_x \quad F_y \quad F_z] \text{ соодветно.}$$

Во исто време поместувањата во било која разгледана точка од елементот може да се претстават преку компоненти на поместувањата (u , v и w) во правец на трите оски од координатниот систем соодветно:

$$u^T = [u \quad v \quad w]$$

Во вакви гранични услови, тензорот на деформации кој се добива за елементот се прикажува како:

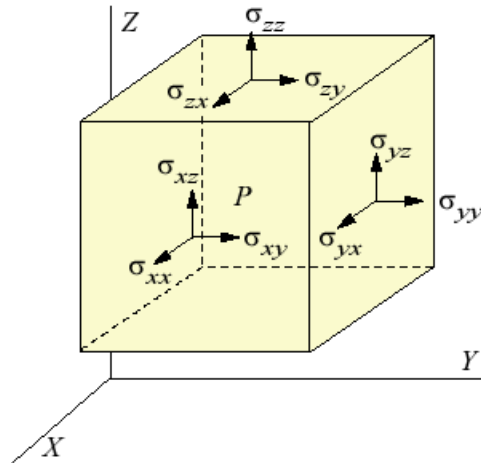
$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \text{sym.} & & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

Бидејќи постои симетрија во прикажениот тензор на деформации, истите може да се запишат како вектор:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = [\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{zz} \quad 2\varepsilon_{xy} \quad 2\varepsilon_{yz} \quad 2\varepsilon_{xz}] \quad (5.1)$$

На сличен начин се претставува тензорот на напоните кои се јавуваат на површината на елементот:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \text{sym.} & & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$



Слика 5.1:

Тензор на напоните на површината на елементот

Односно истиот да се запише во векторски облик:

$$\boldsymbol{\sigma}^T = [\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{xz}] \quad (5.2)$$

Доколку се земат предвид претходните дефиниции, може да се добијат меѓусебните врски на компонентите на тензорите на деформација и компонентите на векторот на поместување:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (5.3)$$

ОДНОСНО:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

Зависноста дадена со изразот (5.3) може да се прикаже и во матричен облик како:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L}\mathbf{u} \quad (5.4)$$

Во ваквиот приказ \mathbf{L} претставува матрица оператор:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Покрај тензорот на деформациите во пресметките се воведува и тензор на ротациите:

$$\omega_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{12} & \omega_{13} \\ \omega_{21} & 0 & \omega_{23} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & 0 \end{bmatrix}$$

Компонентите на овој тензор на ротациите може да се прикаже и во зависност од поместувањата:

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (5.6)$$

Компонентите од тензорот на деформациите не се меѓусебно независни, туку истите исполнуваат услови на компатибилност:

$$\varepsilon_{il,jk} + \varepsilon_{jk,il} - \varepsilon_{ik,jl} - \varepsilon_{jl,ik} = 0 \quad (5.7)$$

Доколку ова го претставиме во развиена форма се добива:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial y \partial z} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial z^2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xz}}{\partial x \partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{xz}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{xz}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{yx}}{\partial y \partial z} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{xz}}{\partial z \partial y} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial x \partial z} &= 0 \end{aligned}$$

Доколку изразите (5.7) и (5.8) ги изразиме во матричен облик, се добива:

$$\mathbf{L}_1 \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0} \quad (5.9)$$

каде што \mathbf{L}_1 претставува матрица оператор:

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} \partial^2/\partial y^2 & \partial^2/\partial x^2 & 0 & -2\partial^2/\partial y^2 & 0 & 0 \\ 0 & \partial^2/\partial z^2 & \partial^2/\partial y^2 & 0 & -2\partial^2/\partial y\partial z & 0 \\ \partial^2/\partial z^2 & 0 & \partial^2/\partial x^2 & 0 & 0 & -2\partial^2/\partial x\partial z \\ \partial^2/\partial y\partial z & 0 & 0 & -\partial^2/\partial x\partial y & \partial^2/\partial x^2 & -\partial^2/\partial x\partial y \\ 0 & \partial^2/\partial x\partial z & 0 & -\partial^2/\partial z\partial y & -\partial^2/\partial x\partial y & \partial^2/\partial y^2 \\ 0 & 0 & \partial^2/\partial x\partial y & \partial^2/\partial z^2 & -\partial^2/\partial x\partial y & -\partial^2/\partial y\partial z \end{bmatrix}$$

Условите на рамнотежа на надворешните и внатрешни сили кои се јавуваат во елементот со мали димензии се дадени преку изразот:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \quad (5.10)$$

Земајќи го предвид изразот (5.2) и векторскиот приказ на надворешното оптоварување од силите, за изразот за рамнотежа (5.10) се добива:

$$\mathbf{L}_2 \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (5.11)$$

Каде \mathbf{L}_2 претставува матрица оператор:

$$\mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial x & \partial/\partial z & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix}$$

За да се дефинира врската помеѓу напоните и деформациите кои се јавуваат кај елемент од еластичен материјал, се користат конститутивните равенства на познатиот Хуков закон:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (5.12)$$

Овој израз според (5.1) и (5.2) може да се претстави и како:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (5.13)$$

каде:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ & & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \\ & & & d_{44} & d_{45} & d_{46} \\ & & & & d_{55} & d_{56} \\ \text{sym.} & & & & & d_{66} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

се нарекува **матрица на крутост на материјалот**. Со оглед на симетријата во матрицата, од сите 36 коефициенти, само 21 коефициент меѓусебно се различни. Зависноста (5.13) може да се сретне и во обликот:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}^{-1}\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\sigma} \quad (5.15)$$

каде **C** се нарекува **матрица на флексибилност на материјалот**.

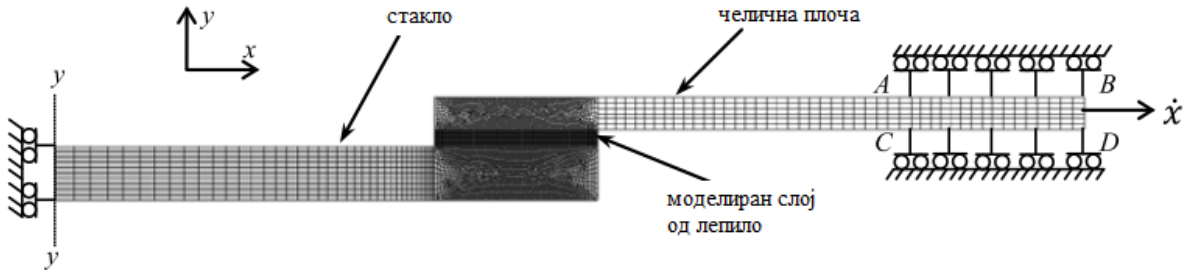
Матриците на крутост и флексибилност може да се претстават и преку главните карактеристики на еластичен материјал: модул на еластичност E и Поасоновиот коефициент ν :

$$\mathbf{D} = \frac{E}{2(1+\mu)} \begin{bmatrix} \frac{2(1-\mu)}{1-2\mu} & \frac{2\mu}{1-2\mu} & \frac{2\mu}{1-2\mu} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{2(1-\mu)}{1-2\mu} & \frac{2\mu}{1-2\mu} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{2(1-\mu)}{1-2\mu} & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0 & 0 \\ & & & & 1 & 0 \\ \text{sym.} & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2(1+\mu) & & \\ & & & & 2(1+\mu) & \\ \text{sym.} & & & & & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

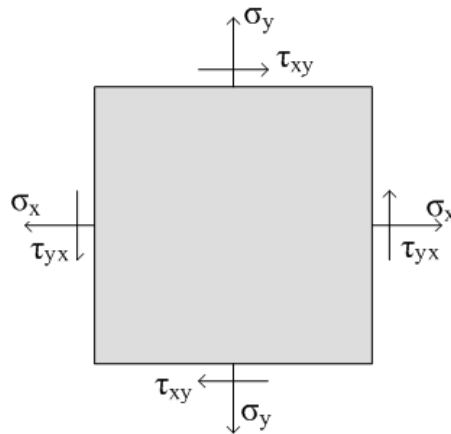
5.2. РАМНИНСКА НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИОНА СОСТОЈБА

Определувањето на напонско-деформационата состојба многу се поедноставува кога проблемите се сведуваат на нивно рамнинско интерпертирање. Во овој случај теоријата на еластичност ги опфаќа напоните и деформациите кои настануваат претставени во рамнинска состојба каде зависат само од два аргументи. Кај рамнинските проблеми може да се примени методот на конечни елементи и принципите на општата теорија. Овој метод на рамнинско разгедување на проблемите често се употребува при локална анализа на врските изведени со лепење. Пример за рамнинска анализа на вакви врски е дадена на слика 5.4 каде преку метод на конечни елементи моделиран е преклопен спој со лепило за анализа на неговото однесување.[2]



Слика 5.4: Рамнинско претставување на јакосна анализа на преклопна врска со лепило [2]

Напоните кои се јавуваат кај еден елемент се наоѓаат во рамнинска состојба ако векторите на надворешните и внатрешните сили се наоѓаат во рамнина паралелна на средната (слика 5.5).



Слика 5.5: Рамнинска состојба на напоните

Векторот на поместувањата во било која точка од елементот има компоненти u и v , кои се функции од координатите на рамнината, x и y :

$$u = u(x, y) \quad v = v(x, y) \quad (5.44)$$

Компонентите на напоните и деформациите кои се различни од нула, соодветно се прикажани како вектори :

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

Во рамнински случај условите за рамнотежа ја добиваат формата:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + F_y &= 0 \end{aligned} \quad (5.46)$$

Врската помеѓу компонентите на деформацијата и компонентите на пометувањата се дадени преку изразот:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L}\mathbf{u} \quad (5.47)$$

каде важи:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (5.48)$$

За условот на компатибилност на деформациите сега се добива:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0 \quad (5.49)$$

Земајќи ја предвид општата врска помеѓу тензорот на деформацијата и тензорот на напоните кој за еластични тела, во случај на рамнинско напрегање или рамнинска деформација каде се вклучени и деформации од температурни влијанија, за тензорите на деформациите и напоните соодветно се добива:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & 0 \\ -\mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} + \alpha t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} - \frac{E\alpha t}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.50)$$

каде α претставува коефициент на топлинско ширење, а t претставува температура, а

$$\frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \text{ се нарекува конститутивна матрица.}$$

Диференцијалните равенки за пресметка на поместувањата добиваат облик:

$$\begin{aligned} \Delta u + \frac{1+\mu}{1-\mu} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{F_x}{G} &= 0 \\ \Delta v + \frac{1+\mu}{1-\mu} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial y} + \frac{F_y}{G} &= 0 \end{aligned} \quad ; \quad (5.51)$$

односно за напоните:

$$\Delta(\sigma_x + \sigma_y) + (1+\mu) \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (5.52)$$

Врската помеѓу компонентите на деформацијата и компонентите на поместувањата претставени во рамнинска состојба се дадени преку изразот:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} \frac{1}{E'_x} & -\mu' & 0 \\ -\mu' & \frac{1}{E'_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} \alpha'_x \\ \alpha'_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

каде: $E'_x = \frac{E}{1-\mu^2}$; $\mu' = \frac{\mu}{1-\mu}$ и $\alpha'_x = \alpha'_y = \alpha(1+\mu)$

Оттука, за диференцијалните равенки за пресметка на поместувањата и напоните, соодветно се добиваат изразите:

$$\begin{aligned} \Delta u + \frac{1}{1-2\mu} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{F_x}{G} &= 0 \\ \Delta v + \frac{1}{1-2\mu} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial y} + \frac{F_y}{G} &= 0 \end{aligned} \quad (5.54)$$

$$\Delta(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{1-\mu} \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (5.55)$$

Со методот на конечни елементи понекогаш може целосно да се претстави 3Д проблем преку сведување на истиот на проблем во рамнина. Во ваков случај третата димензија е влезен параметар кој се дефинира, како на пример дебелината на материјалот. Еден од начините за вакво претставување на проблемот е со дефинирање на состојба на рамнински напони („plane stress“). Во состојбата на рамнински напони третата компонента на напоните во насока на димензијата која не се моделира изнесува нула. Во тој случај страната која не се моделира се претпоставува дека е многу помала во однос на останатите две моделирани со рамнината. Проблемот кој е цел на истражувањето може да се сведе на рамнинска напонско-деформациона состојба и при неговото моделирање искористена е оваа можност.

Општата формулација на конечни елементи кои се користат за моделирање на рамнинската напонско-деформациона состојба ги содржи во себе принципите на

теоријата на еластичност и за поместувањата во елементот (u, v) кои се добиваат со интерполација од поместувањата во јазлите на елементот (u_i, v_i) се добива:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \dots \end{bmatrix} \quad (5.56)$$

односно во скратена форма: $\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{d}$,

каде, \mathbf{N} е матрица составена од интерполациските функции (функции на форма) за елементот, \mathbf{u} претставува вектор од компонентите на поместувањата, а \mathbf{d} претставува вектор од поместувањата во јазлите на елементот.

Врската помеѓу поместувањата и деформациите во елементот е дадена преку изразот: $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}\mathbf{u} = \mathbf{D}\mathbf{N}\mathbf{d}$ односно $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\mathbf{d}$

каде $\mathbf{B} = \mathbf{D}\mathbf{N}$ и се нарекува **матрица на поместување-деформација**.

Енергијата од деформација во елементот се добива преку изразот:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dV = \frac{1}{2} \int_V (\mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon})^T \boldsymbol{\varepsilon} dV = \\ &= \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV \mathbf{d} = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{k} \mathbf{d} \end{aligned} \quad (5.57)$$

Оттука се добива **матрицата на крутост на елементот** преку изразот:

$$\mathbf{k} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV$$

5.3. ТЕОРИЈА НА СВИТКУВАЊЕ НА ПЛОЧИ

5.3.1. ОСНОВНИ РАВЕНСТВА ОД ТЕОРИЈА НА СВИТКУВАЊЕ НА ПЛОЧИ

Анализата и пресметката на напонско-деформационата состојба на плочи при свиткување е значително посложена од анализата на рамнински проблеми од теоријата на еластичност. Имајќи предвид дека во истражувањето се работи за плочести елементи од калено стакло кои значително се деформираат, земена е предвид теоријата на свиткување на тенка изотропна плоча под оптоварувања кои дејствуваат нормално на средната површина на плочата. Притоа, како почетна претпоставка важи Бернулиевата хипотеза за прави пресеци по свиткувањето, односно, површините нормални на средната површина на плочата остануваат прави и по деформирањето (свиткувањето).

На основа на оваа претпоставка, за компонентите од поместувањата по секоја оска соодветно се добиваат следните изрази:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_z = 0 &\Rightarrow w = w(x, y) \\
 \gamma_{zx} = 0 &\Rightarrow u = -zw_{,x} \\
 \gamma_{zy} = 0 &\Rightarrow v = -zw_{,y}
 \end{aligned}
 \tag{5.18}$$

Според ова, тензорите на деформациите кои се различни од нула се добиват како:

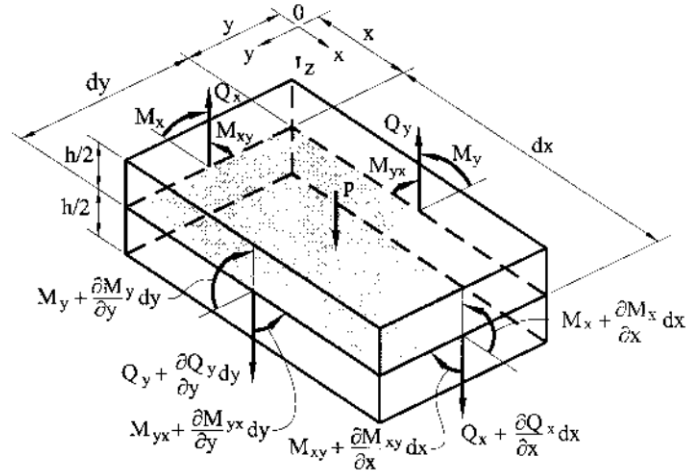
$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= -zw_{,xx} \\ \varepsilon_y &= -zw_{,yy} \\ \gamma_{xy} &= -2zw_{,xy}\end{aligned}\tag{5.19}$$

Врската помеѓу компонентите на напонот и компонентите на поместувањата на база на претпоставката дека се работи за еластичен материјал е:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= -\frac{E}{1-\mu^2}(w_{,xx} + \nu w_{,yy})z \\ \sigma_y &= -\frac{E}{1-\mu^2}(w_{,yy} + \nu w_{,xx})z \\ \tau_{xy} &= -(1-\mu)\frac{E}{1-\mu^2}zw_{,xy}\end{aligned}\tag{5.20}$$

Условите за рамнотежа на диференцијално мал дел од плоча оптоварена на свиткување (слика 5.2) се сведуваат на три парцијални диференцијални равенки од прв ред во кои се појавуваат пет непознати статички големини:

$$\begin{aligned}Q_{x,x} + Q_{y,y} + p &= 0 \\ M_{x,x} + M_{xy,y} - Q_x &= 0 \\ M_{xy,x} + M_{y,y} - Q_y &= 0\end{aligned}\tag{5.21}$$



Слика 5.2: Сили и моменти кои ја напаѓаат средната рамнина

Ако во изразот (5.21) се елиминираат трансферзалните сили Q , тогаш условите за рамнотежа може да се прикажат како диференцијална равенка од втор ред каде фигурираат само компонентите на моментите на свиткување M_x и M_y , и моментот на торзија M_{xy} :

$$M_{x,xx} + 2M_{xy,xy} + M_{y,yy} + p = 0 \quad (5.22)$$

Земајќи ги предвид зависностите во израз (5.20) и дефиницијата за силите во пресекот на делот кој се разгледува, за моментите на свиткување и моментот на торзија се добива:

$$\begin{aligned} M_x &= \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x z dz = -K(w_{,xx} + \nu w_{,yy}) \\ M_y &= \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_y z dz = -K(w_{,yy} + \nu w_{,xx}) \\ M_{xy} &= \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{xy} z dz = -(1-\mu)Kw_{,xy} \end{aligned} \quad (5.23)$$

каде: $K = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ се нарекува **крутост на свиткување на плочата**.

За добивање на трансферзалните сили се користат условите за рамнотежа кои се дадени преку следните изрази:

$$\begin{aligned} Q_x &= -K(w_{,xx} + w_{,yy})_{,x} \\ Q_y &= -K(w_{,xx} + w_{,yy})_{,y} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Ако во изразот (5.21) се заменат изразите (5.24) се добива диференцијалната равенка на класичната теорија на свиткување на изотропни плочи:

$$\begin{aligned} \Delta \Delta w &= \frac{p}{K} \\ \Delta &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (5.25)$$

5.3.2. ТЕОРИЈА НА СВИТКУВАЊЕ НА ПЛОЧИ СО ГОЛЕМИ ДЕФОРМАЦИИ

Хибридните елементи кои се предмет на истражувањето покрај стаклото, во себе содржат деформабилни материјали, лепилото и челичната плоча, кои по настанувањето на лом на елементот од стакло, функционирајќи како композит, обезбедуваат капацитет на преостаната носивост на структурата. Оваа карактеристика е од големо значење за конструктивните елементи бидејќи може да спречи инстантен лом и колапс на елементот во конструкцијата.

Проблемите од механиката на деформабилните тела во основа се нелинеарни, а со тоа и геометриските врски помеѓу деформациските и кинематичките величини, во општ облик, стануваат нелинеарни. Во општ случај, геометриските нелинеарности и нелинеарностите кои произлегуваат од видот на материјалот се јавуваат истовремено како карактеристики на елементот, меѓутоа може да се разгледуваат и поединечно.

Сепак, математичката формулација на нелинеарните проблеми секогаш е комплексна и најчесто се добиваат приближни нумерички решенија. За голем број инженерски случаи линеарната теорија ги покрива и ваквите проблеми и дава приближно точни решенија, па нелинеарната теорија за анализа на проблемот не е потребна. Меѓутоа, во одредени случаи, резултатите во склоп на линеарната теорија за анализа на нелинеарни проблеми може да влијаат на сигурноста на конструкцијата, па за определување на напонско-деформационата состојба на конструкцијата неопходна е примената на нелинеарната теорија.

Бидејќи основните равенства на нелинеарната теорија немаат единствено решение, се бараат приближни решенија на проблемите преку различни математички методи и физичка дискретизација на проблемот. Во вакви случаи, методот на конечни елементи наоѓа успешна примена во решавањето на проблемите.

За одредување на напонско-деформационата состојба на хибридните елементи користен е методот на конечни елементи каде дефинирани се услови на геометриска нелинеарност која подразбира појава на големи деформации при свиткување на плочестите елементи. Со цел да се разбере оваа анализа, во продолжение се дадени основните равенства на теорија на свиткување на плочи при појава на големи деформации.

Компонентите на деформацијата во разгледувана произволна точка од плочата која се наоѓа на растојание z од средната рамнина, може да се прикажат како функции од компонентите на поместување на точките од средната рамнина на плочата ($\mathbf{u}_0, \mathbf{v}_0, \mathbf{w}=\mathbf{w}_0$):

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= u_{0,x} + \frac{1}{2} w_{,x}^2 - z w_{,xx} \\ \varepsilon_y &= v_{0,x} + \frac{1}{2} w_{,y}^2 - z w_{,yy} \\ \omega = \gamma_{xy} &= u_{0,y} + v_{0,x} + w_{,x} w_{,y} - 2z w_{,xy}\end{aligned}\tag{5.26}$$

Со воведување на векторите:

$$\mathbf{e}_0 = \begin{bmatrix} u_{0,x} \\ v_{0,x} \\ u_{0,y} + v_{0,x} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\eta}_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} w_{,x}^2 \\ \frac{1}{2} w_{,y}^2 \\ w_{0,y} w_{,y} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\kappa} = \begin{bmatrix} -w_{,xx} \\ -w_{,yy} \\ -2w_{,xy} \end{bmatrix}\tag{5.27}$$

претходниот израз станува:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_0 + z\boldsymbol{\kappa} \quad \text{каде} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_0 = \mathbf{e}_0 + \boldsymbol{\eta}_0 \quad (5.28)$$

Бидејќи полето на поместувањата во конечниот елемент се прикажува преку интерполациски функции и поместувањата во јазлите на елементот, за компонентите на поместувањата во рамна плоча (\mathbf{u}_0 и \mathbf{v}_0) и компонентите на поместувањата нормални на плочата (w) може да се запишат на следниов начин:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \mathbf{N}_u \mathbf{q}_u \quad (5.29)$$

$$w = \mathbf{N}_w \mathbf{q}_w$$

каде \mathbf{N}_u и \mathbf{N}_w претставуваат матрици и вектор од интерполациски функции, а \mathbf{q}_u и \mathbf{q}_w вектори од соодветните параметри на поместувањата во јазлите за опишување на напрегањето од свиткување.

Со воведување на матриците:

$$\tilde{\mathbf{N}}_w = \begin{bmatrix} N_w & 0 \\ 0 & N_w \end{bmatrix} \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} q_w & 0 \\ 0 & q_w \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

и дефинирање на матрици оператори со облик:

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_3 = - \begin{bmatrix} \partial^2/\partial x^2 \\ \partial^2/\partial y^2 \\ 2\partial^2/\partial x\partial y \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

се добиваат изразите за компонентите на деформацијата во следниот облик:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_0 &= \mathbf{L}_1 \mathbf{N}_u \mathbf{q}_u = \mathbf{B}_u \mathbf{q}_u \\ \boldsymbol{\eta}_0 &= \frac{1}{2} \mathbf{L}_1 \tilde{\mathbf{N}}_w \mathbf{W} \mathbf{L}_2 \mathbf{N}_w \mathbf{q}_w = \frac{1}{2} \mathbf{B}_{w1} \mathbf{W} \mathbf{B}_{w2} \mathbf{q}_w \\ \boldsymbol{\kappa} &= \mathbf{L}_3 \mathbf{N}_w \mathbf{q}_w = \mathbf{B}_{w3} \mathbf{q}_w \end{aligned} \quad (5.32)$$

каде:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B}_u &= \mathbf{L}_1 \mathbf{N}_u \\
 \mathbf{B}_{w1} &= \mathbf{L}_1 \tilde{\mathbf{N}}_w \\
 \mathbf{B}_{w2} &= \mathbf{L}_2 \mathbf{N}_w \\
 \mathbf{B}_{w3} &= \mathbf{L}_3 \mathbf{N}_w
 \end{aligned} \quad , \quad (5.33)$$

каде матриците \mathbf{B} се добиваат како први изводи од интерполациските функции, освен матрицата \mathbf{B}_{w3} , која се добива како втор извод од истите.

Енергијата од деформацијата на елементот може да се пресмета од следниот израз:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} dv = \frac{1}{2} \int_{F+h/2}^{+h/2} \int \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \\ z\boldsymbol{\kappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{D} \\ \mathbf{D} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \\ z\boldsymbol{\kappa} \end{bmatrix} dz dF = \\
 &= \frac{1}{2} \int_F \boldsymbol{\varepsilon}_0^T \mathbf{D}_{11} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dF + \frac{1}{2} \int_F \boldsymbol{\varepsilon}_0^T \mathbf{D}_{12} \boldsymbol{\kappa} dF + \frac{1}{2} \int_F \boldsymbol{\kappa}^T \mathbf{D}_{22} \boldsymbol{\kappa} dF = \mathbf{A}_m + \mathbf{A}_{mb} + \mathbf{A}_b
 \end{aligned} \quad (5.34)$$

каде: $\mathbf{D}_{11} = \int_{-h/2}^{+h/2} \mathbf{D} dz$; $\mathbf{D}_{12} = \int_{-h/2}^{+h/2} z \mathbf{D} dz$; $\mathbf{D}_{22} = \int_{-h/2}^{+h/2} z^2 \mathbf{D} dz$, а индексите m и b го

означуваат мембранскиот дел во свиткувањето. Матрицата \mathbf{D}_{12} добива вредност нула кога се работи за хомогени изотропни плочи, како што е елементот од стакло, па за изразот за енергијата од деформацијата се менува:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{2} \mathbf{q}_u^T \mathbf{k}_{uu} \mathbf{q}_u + \frac{1}{2} \mathbf{q}_w^T \left(\int_F \mathbf{B}_{w2}^T \mathbf{W}^T \mathbf{G}_1 \mathbf{W} \mathbf{B}_{w2} dF \right) \mathbf{q}_w + \frac{1}{2} \mathbf{q}_w^T \left(\int_F \mathbf{B}_{w2}^T \mathbf{W}^T \mathbf{G}_2 dF \right) \mathbf{q}_u \\
 A_{mb} &= \mathbf{q}_u^T \mathbf{k}_{uw} + \frac{1}{2} \mathbf{q}_w^T \left(\int_F \mathbf{B}_w^T \mathbf{W}^T \mathbf{G}_3 dF \right) \mathbf{q}_w \\
 A_b &= \frac{1}{2} \mathbf{q}_w^T \mathbf{k}_{ww} \mathbf{q}_w
 \end{aligned} \quad (5.35)$$

каде:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_{uu} &= \int_F \mathbf{B}_u^T \mathbf{D}_{11} \mathbf{B}_u dF \\ \mathbf{k}_{wu} &= \int_F \mathbf{B}_u^T \mathbf{D}_{12} \mathbf{B}_{w3} dF \\ \mathbf{k}_{ww} &= \int_F \mathbf{B}_{w3}^T \mathbf{D}_{22} \mathbf{B}_{w3} dF \\ \mathbf{G}_1 &= \mathbf{B}_{w1}^T \mathbf{D}_{11} \mathbf{B}_{w1} \\ \mathbf{G}_2 &= \mathbf{B}_{w1}^T \mathbf{D}_{11} \mathbf{B}_u \\ \mathbf{G}_3 &= \mathbf{B}_{w1}^T \mathbf{D}_{12} \mathbf{B}_{w3} \end{aligned}$$

Во изразот (5.35) со помош на членовите вон интегралот се дефинира енергијата од деформација според линеарната теорија за свиткување, додека членовите под интеграл се последица од нелинеарната врска помеѓу деформацијата и поместувањата.

Изразот за рамнотежа даден во општ облик гласи:

$$\mathbf{kq} = \mathbf{Q} \quad (5.36)$$

или во развиена матрична форма:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k}_{uu} & \mathbf{k}_{uw} \\ \mathbf{k}_{wu} & \mathbf{k}_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_u \\ \mathbf{q}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_u \\ \mathbf{Q}_w \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

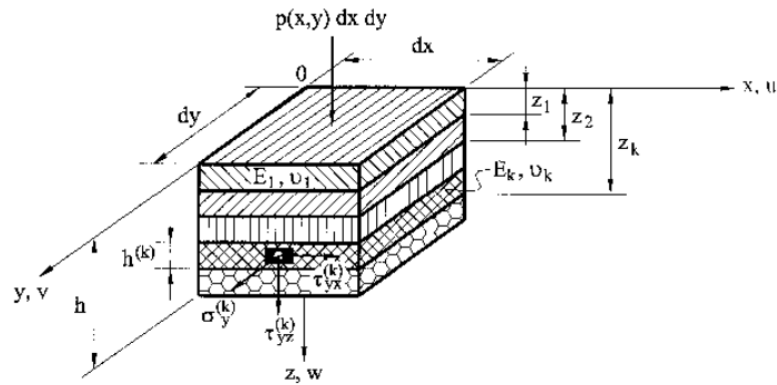
Овие услови за рамнотежа претставуваат систем од нелинеарни алгебарски равенки кои зависат од поместувањето, во кои матрицата \mathbf{k} има значење на тангента на матрицата на крутост. Преку наредните изрази (5.38) дадена е општата формулација на проблемот на геометриска нелинеарност на плочите која се базира на претпоставките дека деформациите се мали а поместувањата \mathbf{w} доволно големи величини, така што мора да се земат предвид при формирањето на геометриските и статичките равенства. Во истиот израз, членовите вон интегралите претставуваат класични матрици на крутост додека членовите под интегралниот знак се нелинеарни и претставуваат инкрементални односно геометриски матрици на крутост.

$$\begin{aligned}
\mathbf{k}_{uu} &= \hat{\mathbf{k}}_{uu} \\
\mathbf{k}_{uw} &= \hat{\mathbf{k}}_{uw} + \frac{1}{2} \int_F \mathbf{G}_2^T \mathbf{W} \mathbf{B}_{w3} dF \\
\mathbf{k}_{wu} &= \hat{\mathbf{k}}_{wu} + \frac{1}{2} \int_F \mathbf{B}_{w2}^T \mathbf{W}^T \mathbf{G}_2 dF \\
\mathbf{k}_{ww} &= \hat{\mathbf{k}}_{ww} + \int_F \mathbf{B}_{w2}^T \mathbf{W}^T \mathbf{G}_2 \mathbf{W} \mathbf{B}_{w2} dF + \int_F \mathbf{B}_{w2}^T \mathbf{W}^T \mathbf{G}_3 dF
\end{aligned} \tag{5.38}$$

5.3.3. ПЛОЧИ СО ЛАМИНИРАНА СТРУКТУРА

Плочестите елементи составени од повеќе слоеви од изотропни или анизотропни материјали помеѓу себе поврзани со врски со лепење се нарекуваат композити со ламинирана структура. Однесувањето на овие композити дава многу предности во однос на обичните плочести елементи. Пресметката на соодветните јакосни и деформации големини под дејство на надворешно оптоварување се разликува од пресметка на овие големини на обична плоча. Структурата може да биде составена од различен број, вид и дебелина на слоеви (слика 5.3). Формирањето на карактеристичните диференцијални равенки за напонско-деформационата состојба е во рамките на класичната теорија за пресметка на плоча при свиткување. Изразите се добиваат на база на две претпоставки:

- Индивидуалните слоеви се од изотропен материјал (како што се стаклото и челикот)
- Лизгањето помеѓу слоевите е ограничено



Слика 5.3: Различни модели од предложениот концепт

На база на овие претпоставки и познатите изрази од теоријата за плочи изложена претходно во склоп на оваа глава, се добиваат изразите за пресметка за деформациите во k -тиот слој од структурата:

$$\varepsilon_x^{(k)} = -z_k \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \varepsilon_y^{(k)} = -z_k \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \gamma_{xy}^{(k)} = -2z_k \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (5.39)$$

Од Хуковиот закон за компонентите од напонот се добива:

$$\sigma_x^{(k)} = \frac{E_k}{1 - \mu_k^2} (\varepsilon_x^{(k)} + \mu_k \varepsilon_y^{(k)}); \quad \sigma_y^{(k)} = \frac{E_k}{1 - \mu_k^2} (\varepsilon_y^{(k)} + \mu_k \varepsilon_x^{(k)}); \quad \tau_{xy}^{(k)} = \frac{E_k}{2(1 + \mu_k)} \gamma_{xy}^{(k)} \quad (5.40)$$

Со замена на изразите за пресметка на компонентите од деформациите (5.39) во (5.40) и со интегрирање по секој слој од структурата се добиваат следните изрази за пресметка на напоните на свиткување и торзија:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_k \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)} z dz \quad (5.41)$$

Компонентите на напоните во k -тиот слој тогаш може да се пресметаат како во следниот израз (5.42):

$$\sigma_x^{(k)} = -z_k \frac{E_k}{1-\mu_k^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu_k \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \quad \sigma_y^{(k)} = -z_k \frac{E_k}{1-\mu_k^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu_k \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right); \quad \tau_{xy}^{(k)} = -z_k \frac{E_k}{1+\mu_k} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

Добиената диференцијална равенка за пресметка на повеќеслојни плочи е слична на општата за хомогените плочи, каде крутоста на плочата D се заменува со т.н трансформирана крутост D_t на ламинираната структура:

$$D_t \nabla^2 \nabla^2 w(x, y) = p(x, y) \quad (5.43)$$

каде трансформираната крутост се пресметува како: $D_t = \frac{AC - B^2}{A}$, а константите А, В и

С се дадени преку изразите:

$$A = \sum_k \frac{E_k}{1-\mu_k^2} (z_k - z_{k-1}); \quad B = \sum_k \frac{E_k}{1-\mu_k^2} \left(\frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} \right); \quad C = \sum_k \frac{E_k}{1-\mu_k^2} \left(\frac{z_k^3 - z_{k-1}^3}{3} \right)$$

5.4. ПРОСТОРНА НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИОНА СОСТОЈБА

Претставувањето на просторно напонско-деформациона состојба со методот на конечни елементи е прилично сложено и бара посебно внимание при дефинирањето на мрежата и видот на конечни елементи кои ќе се употребат. При решавањето на проблемот на свиткување на плочи, односно моделирање на хибридните елементи кои се дел од истражувањето, се добива ваква просторна состојба на напонско-деформационите карактеристики. Основниот избор на конечни елементи за ваков случај се 3Д солид елементите кои најблиску ја претставуваат состојбата до реалната. Од друга страна бидејќи се работи за плочести елементи, проблемот може да се поедностави и да се скрати времето на постигнување на конвергенција со употреба на посебен вид на луспи кои

имаат 3Д форма меѓутоа пресметуваат напони и деформации во една рамнина на елементот.

Во формулацијата на плочестите елементи дадени се релациите помеѓу компонентите на напоните и поместувањата кои се пресметуваат во јазлите на елементот:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\mu)c & \mu c & \mu c & 0 & 0 & 0 \\ \mu c & (1-\mu)c & \mu c & 0 & 0 & 0 \\ \mu c & \mu c & (1-\mu)c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (5.56)$$

каде: $c = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)}$; $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$

Интерполацијата на поместувањата во елементот е претставена со изразот:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \dots \end{bmatrix} \quad (5.57)$$

Врските помеѓу поместувањата и деформациите во елементот се претставуваат преку изразите:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= u_{,x} & \varepsilon_y &= v_{,y} & \varepsilon_z &= w_{,z} \\ \gamma_{xy} &= u_{,y} + v_{,x} & \gamma_{yz} &= v_{,z} + w_{,y} & \gamma_{zx} &= u_{,z} + w_{,x} \end{aligned}$$

Или ако истите се запишат векторски се добива: $[\varepsilon] = [B][U]$

Оттука матрицата на крутост за елементот е:

$$k = \int_V [B]^T [E][B] dV$$

Изборот на плочест елемент искористен во истражувањето се карактеризира со некомпатибилна формулација за пресметка на напоните и деформациите во елементот.

Дефинирањето на некомпатибилноста на елементот всушност претставува внесување на дополнителни степени на слобода на деформирање во самиот елемент покрај степените на слобода на поместување кои веќе постојат, со цел подобрување на способноста за моделирање на свиткувањето како напрегање. Основниот ефект на додадените степени на слобода е со цел елиминирање на т.н паразитски напони на смолкнување кои се јавуваат кај регуларните елементи со кои се моделира поместување кога истите се напрегнати на свиткување. Дополнителна задача на некомпатибилните модови е отстранување на вештачкото зајакнување на елементот кое се јавува поради Поасоновите ефект при свиткување. Кај регуларните елементи за поместување линеарната промена на аксијалните напони при свиткување е пропратена со промена на напоните нормални на правецот на свиткување што доведува до погрешни резултати од анализата и зголемена целокупна крутост. Оваа појава се спречува со воведување на некомпатибилните модови. Елементите со некомпатибилен мод на однесување функционираат еднакво точно како и елементите од втор ред доколку нивната форма е речиси квадратна.

Некомпатибилните модови во случај на геометриска нелинеарност т.е. големи деформации, може да се дефинираат како модификација на градиентот на деформација F , односно:

$$\bar{F} = F + \tilde{F}$$

На овој начин се добиваат елементи кои го задоволуваат patch тестот, меѓутоа бидејќи се работи за големи деформации, елементот може да претрпи дисторзија (изобличување) и во наредниот инкремент patch тестот да не биде задоволен. За таа цел се воведува тензор на деформацијата кој се додава на стандардно пресметаната деформација:

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \dot{\epsilon} + \dot{\tilde{\epsilon}}$$

Сега, вкупниот градиент на трансформацијата може да се добие како производ од градиентите на трансформација во секој поединечен инкремент:

$$\bar{F}^{(n+1)} = \Delta \bar{F}^{(n+1)} \cdot \bar{F}^{(n)} \cdot \dots \cdot \Delta \bar{F}^{(1)}$$

Главните некомпатибилни модови се додаваат на градиентите на деформација во поединечен инкремент:

$$\Delta \bar{F}_p = \Delta F + \Delta \tilde{F} = \frac{\partial x_t + \Delta t}{\partial x_t} + \Delta \tilde{F}$$

За главните некомпатибилни модови може да се дефинираат како трансформација на параметарското поле на градиентот $\Delta \tilde{g}(\xi)$:

$$\Delta \tilde{F}(\xi) = \frac{j(0)}{j(\xi)} \Big|_t \Delta \tilde{g}(\xi) \cdot t_t^{-1}$$

при што t_t претставува параметарска трансформација во центарот на елементот на почетокот од инкрементот:

$$t_t = \frac{\partial x_t}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0}$$

каде $j(\mathbf{x})$ е Јакобиан на параметарската трансформација на локација \mathbf{x} , а $j(0)$ претставува Јакобиан во центарот, на почетокот на инкрементот. Притоа, $j(\mathbf{x})$ се пресметува на база на деформацијата предизвикана од поместувањата во јазлите и не ја вклучува промената на волуменот на елементот.

Во нелинеарната формулација, полето на параметричкиот градиент во инкрементот ја има истата форма како и во линеарната формулација на елементот:

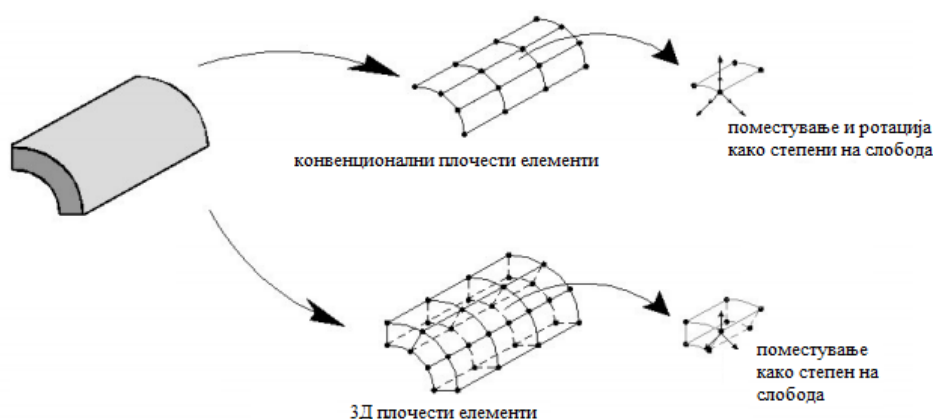
$$\Delta \tilde{g}(\xi) = \Delta \alpha^i \xi_i$$

од каде се добива главниот градиент на деформација за инкрементот:

$$\Delta \tilde{F}(\xi) = \Delta \alpha^i \frac{j(0)}{j(\xi)} \Big|_t \xi_i \cdot t_t^{-1}$$

Од друга страна, за моделирање на проблемот на свиткување на плочи, може да се користат и посебен вид на лушпи елементи кои се нарекуваат 3Д лушпи. Овие елементи

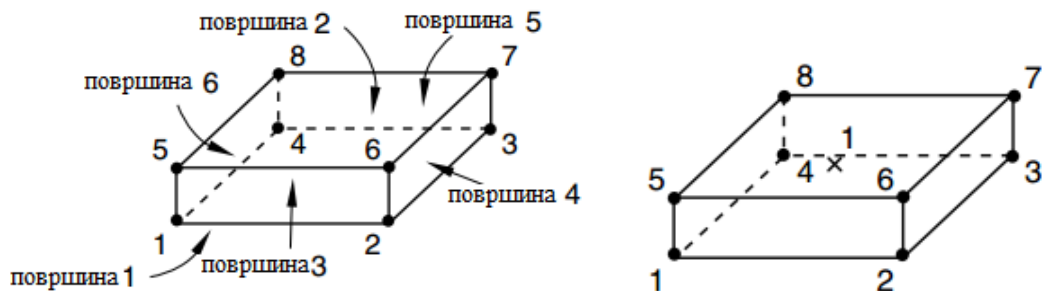
имаат ограничени мембрански деформации и земаат предвид произволни ротации во јазлите што ги прави соодветни за употреба во случај на геометриска нелинеарност. Дополнително при решавањето, елементите ја користат теоријата од прв ред за ламинирани композити и за разлика од регуларните лушпи како конечни елементи може да дадат поголема точност во одредување на промените по дебелината на елементот (слика 5.6).



Слика 5.6: Формирање на мрежа со лушпи и 3Д лушпи елементи

Пресметката на промените по дебелината на моделот се базира на промените во поместувањата пресметани во јазлите на елементот, кои пак се пресметуваат на база на модулот на еластичност дефиниран на почетокот на анализата. За разлика од конвенционалните лушпи каде компонентата на напонот во насока на дебелината на моделот е нула и каде деформациите во оваа насока се пресметуваат на база на вредноста на поасоновиот коефициент, кај 3Д лушпите оваа компонента може да биде различна од нула што предизвикува дополнителна деформација покрај онаа ограничена од поасоновиот коефициент.

Ваков елемент е употребен за формирање на мрежата и решавање на хибридните модели во истражувањето, 3Д лушпа елемент со вкупно осум јазли (слика 5.7), кој ја дава рамнинската состојба на напоните во рамнината во која е дефиниран самиот елемент (површина 1) земајќи ги предвид и промените по дебелината на елементот. При анализата на моделот, елементот користи редуцирана интеграција односно има една точка на интеграција која се наоѓа во центарот на елементот.



Слика 5.7: 3Д лушпа елемент SC8R (лево) и точка на интеграција (десно)

При формулацијата на овој вид на лушпи, се земаат предвид неколку претпоставки: вертикалата во правец на нормалата на површината на елементот останува права и со непроменета должина и по настанување на деформацијата; вредноста на компонентата на напонот по правец на нормалата, во изразот за енергија од деформацијата може да се занемари; меѓутоа кај овој елемент не важи претпоставката дека нормалата на површината на елементот останува непроменета по настанување на деформацијата, со што се земаат предвид влијанијата на трансферзалните сили во вкупната деформација.

Врската помеѓу Декартовите координати x, y и z и координатите од локалниот координатен систем ξ, η и ζ во било која точка на елементот, е дадена преку изразот:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \sum_i N_i(\xi, \eta) \frac{1+\zeta}{2} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}_g + \sum_i N_i(\xi, \eta) \frac{1-\zeta}{2} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}_d \quad (5.58)$$

каде g и d ги означуваат горната и долната рамнина на елементот, соодветно, а со N_i се дадени интерполациските функции (функции на форма) чијшто вид зависи од природата на проблемот кој решава. Со воведување на векторот:

$$\mathbf{V}_{3i} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}_g - \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}_d$$

кој ја претставува должината на елементот по правец на нормалата, изразот (5.58) може да се претстави во форма:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \sum_i N_i(\xi, \eta) \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \sum_i N_i(\xi, \eta) \frac{\zeta}{2} \mathbf{V}_{3i} \quad (5.59)$$

кадешто координатите x_i, y_i и z_i ги одредуваат точките од средната рамнина на елементот.

Земајќи ја во предвид претпоставката дека дилатацијата во правец на нормалата на средната површина на елементот изнесува нула, полето на поместувањата е еднозначно определено со помош на три компоненти од векторот на поместување u_i, v_i и w_i во точките од средната рамнина и двете ротации α_i и β_i од векторот V_{zi} околу двете оски кои се нормални на него. Поместувањата u, v и w се усвојуваат соодветно во однос на глобалниот координатен систем.

На база на претходното, за поместувањата во било која разгледана точка од елементот се добива:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \sum_i N_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} + \sum_i N_i \zeta \frac{h_i}{2} [\mathbf{v}_{1i} - \mathbf{v}_{2i}] \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (5.60)$$

Со помош на изразот (5.60), полето на поместувања во елементот како тродимензионално тело, е претставено преку поместувањата и интерполациските функции за средната површина на елементот.

Општиот израз за врската помеѓу компонентите на деформациите и компонентите на поместувањата е:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

$$\text{кој може да се прикаже и во облик: } \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S}\mathbf{u}_{,x} \quad (5.62)$$

каде важи:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad \mathbf{u}_{,x} = [u_{,x} \quad u_{,y} \quad u_{,z} \quad \cdots \quad w_{,x} \quad w_{,y} \quad w_{,z}]$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Врската помеѓу поместувањата во глобалниот и локалниот систем се дадени преку изразот:

$$\begin{bmatrix} u_{,x} & v_{,x} & w_{,x} \\ u_{,y} & v_{,y} & w_{,y} \\ u_{,z} & v_{,z} & w_{,z} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} u_{,\xi} & v_{,\xi} & w_{,\xi} \\ u_{,\eta} & v_{,\eta} & w_{,\eta} \\ u_{,\zeta} & v_{,\zeta} & w_{,\zeta} \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

каде \mathbf{J} претставува Јакобиан на трансформацијата:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} x_{,\xi} & y_{,\xi} & z_{,\xi} \\ x_{,\eta} & y_{,\eta} & z_{,\eta} \\ x_{,\zeta} & y_{,\zeta} & z_{,\zeta} \end{bmatrix} \quad (5.64)$$

Изразот (5.63) може да се прикаже и во посоодветна форма:

$$\begin{bmatrix} u_{,x} \\ u_{,y} \\ u_{,z} \\ v_{,x} \\ v_{,y} \\ v_{,z} \\ w_{,x} \\ w_{,y} \\ w_{,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{J}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{J}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{,\xi} \\ u_{,\eta} \\ u_{,\zeta} \\ v_{,\xi} \\ v_{,\eta} \\ v_{,\zeta} \\ w_{,\xi} \\ w_{,\eta} \\ w_{,\zeta} \end{bmatrix} \quad (5.65)$$

Со претставување на изразот (5.62) во форма: $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\mathbf{q}$

$$\text{каде: } \mathbf{B} = \sum_i \mathbf{S}_i \mathbf{R}_i = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2 \quad \mathbf{B}_3]$$

Кога е одредена оваа матрица \mathbf{B} , матрицата на крутост на елементот може се пресметува според изразот добиен по Гаусовата постапка за нумеричка интеграција:

$$\mathbf{k} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \det \mathbf{J} d\xi d\eta d\zeta \quad (5.66)$$

Матрицата \mathbf{D} која се јавува во изразот (5.66) се разликува од соодветната матрица за тродимензионалните елементи по тоа што сите елементи од третата координата се еднакви на нули бидејќи компонентата на напонот во правец на нормалата на елементот е нула. Врските помеѓу напоните и деформациите се прикажуваат во локални координати:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sigma'_x \\ \sigma'_y \\ \sigma'_z \\ \tau'_{xy} \\ \tau'_{yz} \\ \tau'_{zx} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{E}{1-\mu^2} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \mu & & & & \\ \mu & 1 & & & & \\ & & 0 & & & \\ & & & \frac{1-\mu}{2} & & \\ & & & & \frac{1-\mu}{2} & \\ & & & & & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}} \underbrace{\begin{bmatrix} \varepsilon'_x \\ \varepsilon'_y \\ \varepsilon'_z \\ \gamma'_{xy} \\ \gamma'_{yz} \\ \gamma'_{zx} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (5.67)$$

каде E претставува модул на еластичност, а μ Поасонов коефициент. За добивање на матрицата \mathbf{D} неопходно е да се направи трансформација од локални во глобални координати:

$$\mathbf{D} = \mathbf{T}^T \mathbf{D}' \mathbf{T} \quad \text{каде важи: } \mathbf{T} = [\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \mathbf{v}_3]$$

Ако се земе предвид дека елементите на матрицата \mathbf{B} се независни од третата координата ζ или се линеарни функции од истата, се добива:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1 \zeta \quad (5.68)$$

Со замена на (5.68) во (5.66), изведување на интеграцијата на изразот (5.66) по променливата ζ и примена на изразите:

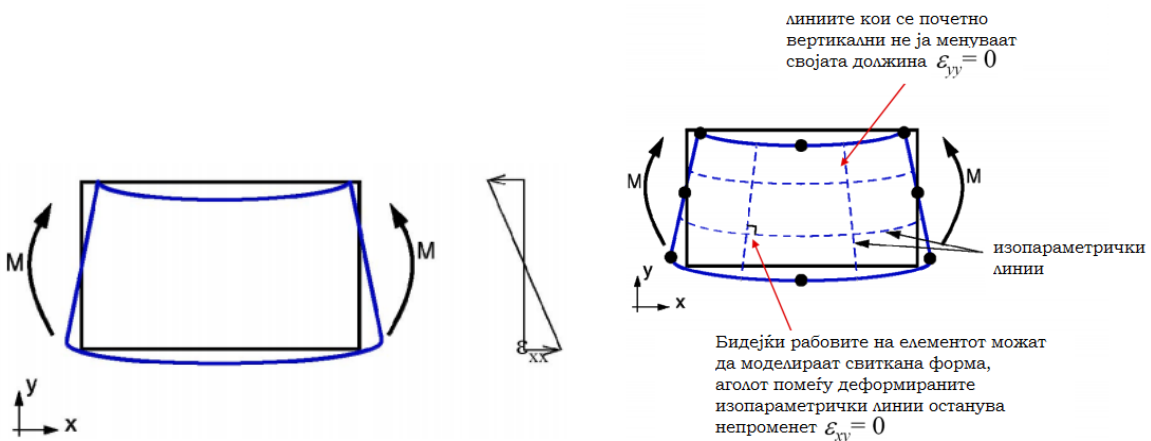
$$\int_{-1}^1 d\zeta = 1 \quad \int_{-1}^1 \zeta d\zeta = 0 \quad \int_{-1}^1 \zeta^2 d\zeta = 2/3$$

за матрицата на крутост се добива:

$$\mathbf{k} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (2\mathbf{B}_0^T \mathbf{D} \mathbf{B}_0 + \frac{2}{3} \mathbf{B}_1^T \mathbf{D} \mathbf{B}_1) \det \mathbf{J} d\xi d\eta \quad (5.69)$$

5.5. ПРОБЛЕМИ ПРИ АНАЛИЗА НА СВИТКУВАЊЕ СО КОНЕЧНИ ЕЛЕМЕНТИ

Тенденцијата на нумеричкото моделирање на чисто свиткување е да преку конечните елементи се дефинираат основните карактеристики на оваа физичка појава. Една од претпоставките кои треба да ги моделира елементот е дека нормалните напречни пресеци остануваат нормални и во текот на деформирањето. Аксијалното издолжување ϵ_{xx} се менува линеарно по дебелината на напречниот пресек, како што е прикажано на сликата. Од друга страна, издолжувањето во y – насоката, ϵ_{yy} е нула кога силата на смолкнување е нула, како во случајот на чисто свиткување. Последната претпоставка која треба да ја опфати елементот е непостоење на мембранско издолжување од смолкнување во пресекот кое физички настанува при свиткување во рамнината на самиот пресек. Во однос на деформациите на елементот во ваков случај тоа би значело дека страните паралелни на оската на свиткување лежат на кружен лак. (слика 5.8).



Слика 5.8: Физички карактеристики на чисто свиткување

Слика 5.9: Изопараметрички линии кај просторен елемент од втор ред

При моделирање на свиткување може да се користат различни видови на елементи меѓутоа секогаш изборот на соодветниот вид на елемент мора да се прави внимателно зависно од предметот на интерес при вакво напрегање. Доколку изборот на елемент е солид елемент од втор ред (CPE8, C3D20R), при употреба и на целосно интегрирање и редуцирано интегрирање, аксијалното издолжување се добива преку промената на должината на почетно хоризонталните линии во елементот (слика 5.9).

Од друга страна, издолжувањето по дебелина на елементот ϵ_{yy} и издолжувањето од смолкнување ϵ_{xy} изнесуваат нула.

Свиткувањето во Abaqus може да се моделира и со употреба на солид елементи од прв ред кои користат целосна интеграција (CPS4, CPE4, C3D8). Овие елементи се така формулирани што при деформација од надворешно оптоварување рабовите остануваат секогаш прави. Поради ваквата формулација елементот детектира издолжување од смолкнување во точките на интеграција кое во реалната физичка појава не постои. Издолжувањето од смолкнување $\epsilon_{xy} \neq 0$ се јавува поради промена на аголот помеѓу изопараметричките линии кој по деформацијата повеќе не изнесува 90° (слика 5.10).



Слика 5.10: Ефект на Shear locking

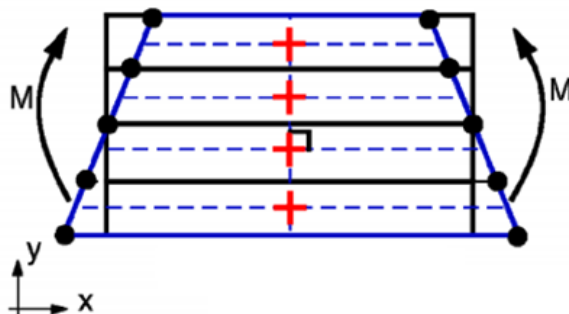


Слика 5.11: Ефект на Hourglassing

Поради енергијата која се троши на смолкнување на елементот, а не негово свиткување, се добива елемент со голема крутост. Овој ефект кој се јавува кај елементот се нарекува „*shear locking*“. Тоа воедно е причина зошто овој вид на елемент не се препорачува за употреба во места каде доминира свиткувањето како напрегање. Еден од начините како да се елиминира ефектот е да се користат просторни елементи од прв ред кои користат редуцирана интеграција (CPE4R, ...). Користејќи ги овие елементи се

избегнува појавата на непостоечки деформации од смолкнување, меѓутоа се јавува нова појава која претставува проблем за решавање, „*hourglassing*“. Причина за оваа појава е постоењето на само една точка на интегрирање. Во тој случај должината на изопараметричките линии останува непроменета односно не постои издолжување во точката на интеграција. Доколку се користи само еден слој од вакви елементи по дебелината на моделот, овој елемент не ја детектира елонгацијата од свиткување, односно се прикажува деформација, а излезните резултати покажуваат деформациона енергија која е нула (*zero-energy mode*), односно елонгацијата изнесува нула (слика 5.11).

Појавата на „*hourglassing*“ може да се провлекува низ мрежата на моделот доколку се користат елементи од прв ред со редуцирана интеграција и решавањето на моделот даде погрешни резултати. Сепак постои начин како да се избегне ова доколку се користат повеќе елементи по дебелината на моделот, најмалку четири (слика 5.12). Тогаш, секој елемент ќе детектира промена на издолжувањето или од збивање или од затегнување, меѓутоа не и од двете напрегања во исто време. Во исто време, доколку постојат аксијални издолжувања, тие се мерат точно, а издолжувањата од смолкнување се нула. Во ваква конфигурација употребата на овие елементи е многу ефективна и моделот е решен за кратко време без потреба од голема меморија.



Слика 5.12: Некомпатибилна формулација

Последен начин како може да се моделира чисто свиткување е со користење на елементи со некомпатибилна формулација (CPS4I, C3D8I...). Овие елементи се најнефективни при моделирање на напрегања каде доминира свиткувањето. Претставуваат компромис помеѓу користењето на елементи од прв и втор ред со редуцирана интеграција и нивните предности. Елементите точно го моделираат смолкнувањето со неговите атрибути како реалната физичка појава, односно, не постојат издолжувања од смолкнување кај чисто свиткување. Од друга страна, свиткувањето како напрегање се детектира и при употреба на само еден слој од овие елементи по дебелината

на моделот. Дополнително, нема појава на „*hourglassing*” и соодветно функционираат при моделирање на пластичност или проблеми кои вклучуваат контакт на повеќе делови. Нивните предности во однос на елементите од прв ред со редуцирана интеграција се намалуваат единствено кога ќе се јави големо изобличување, меѓутоа сите видови на конечни елементи имаат лоши перформанси доколку се јави сериозно изобличување на елементите во склоп на мрежата на моделот.

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИСТРАЖУВАЊА

Во денешно време, кога стаклото се употребува како материјал во носечки елементи, јакоста на свиткување на стаклото игра огромна улога во целокупната носивост на елементот. Експерименталните испитувања изведени во склоп на истражувањето, се однесуваат на одредување на јакоста на свиткување на елементи од калено стакло, како и на предложените хибридни елементи од стакло и челик.

Оваа глава ги опфаќа експерименталните испитувања изведени во текот на истражувањето. Во почетокот е претставена експерименталната програма во која се дадени фазите на испитувањето, а исто така е даден и опис на примероците од конструктивните елементи кои се испитувани. Понатаму е објаснет методот на испитување и стандардот според кои се извршени тестирањата. Претставен е и начинот на формирање на хибридната структура за примероците кои се предмет на испитувањето, како и целокупната постапка на испитување, а преку фотографии прикажани се делови од испитувањето и карактеристичните појави кои се јавуваат во текот на изведување на експериментот. На крајот од главата дадени се резултатите од испитувањето прикажани графички во споредбени дијаграми кои се детално обработени и анализирани.

6.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОГРАМА

6.1.2 ИСПИТНИ МОДЕЛИ

Целта на експерименталните испитувања во истражувањето е одредување на јакоста на свиткување на новите концепти на хибридни плочести елементи од калено стакло и перфориран челичен лим. Во тој контекст, експерименталната програма се состои од две фази, прва фаза која опфаќа испитување на пробни парчиња од калено стакло (слика 6.1), и одредување на јакоста на свиткување на хибридните елементи како втора фаза (слика 6.2).

Константните параметри кои се земаат предвид во текот на испитувањето се брзината на притискање, почетната позиција на притиснувачите како и температурата на изведување на испитувањето.

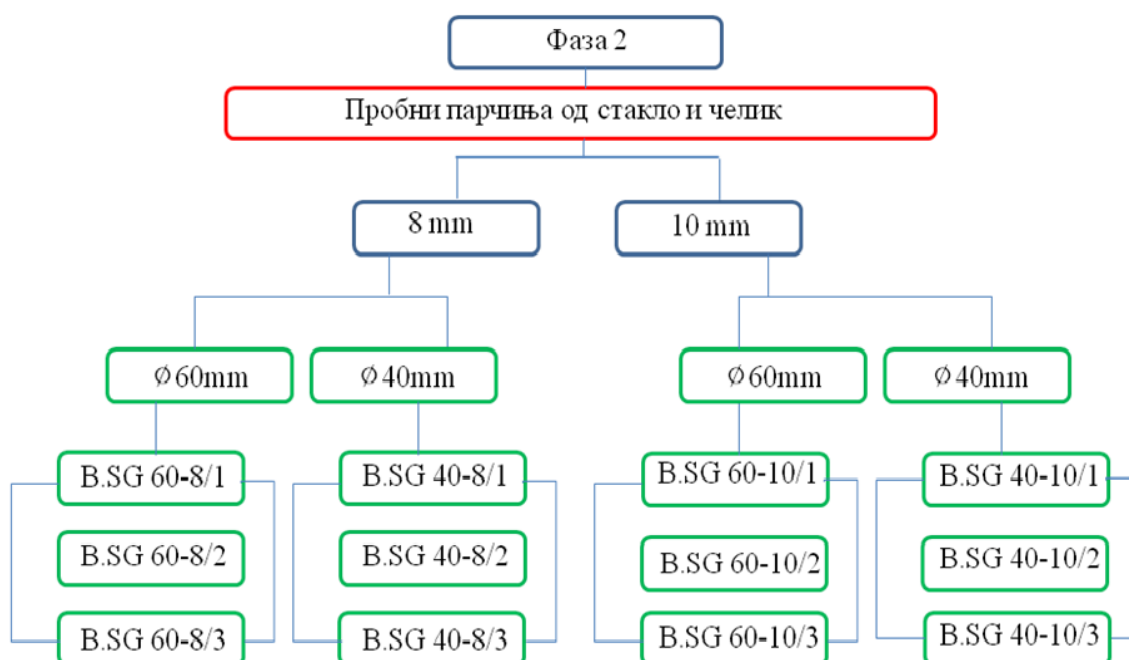
Како променливи параметри дефинирани се две различни дебелини на стаклото, 8 и 10mm, како и две различни димензии на перфорацијата на зајакнувачкиот елемент, кружни форми со дијаметар 40 и 60mm.

Според овие дефинирани параметри, испитани се вкупно 16 испитни парчиња, меѓу кои 4 испитни парчиња во првата и 12 пробни парчиња во втората фаза од испитувањето.



Слика 6.1: Фаза 1 од експерименталните испитувања

Концептот на предложените конструктивни елементи се состои од елемент изработен од рамно калено стакло кој преку површинско лепење е поврзан со перфориран зајакнувачки елемент изработен од нерѓосувачки челик. Пробните парчиња од силикатно стакло подлежат на процес на калење изведен под идентични услови на термичка обработка за двете дебелини поединечно. Притоа, сечењето во потребните димензии и обработката на површината и рабовите е направена пред самиот процес на калење што е дефинирано во стандардот *EN 1288-1:2000*.



Слика 6.2: Фаза 2 од експерименталните испитувања

Димензиите на изведените испитни парчиња се дефинирани во самиот стандард по кој се врши испитувањето, должина $L = 1100\text{mm}$ и ширина $b = 300\text{mm}$ и овие нивни димензии претставуваат константни параметри во испитувањето. Вака подготвени парчињата од стакло се испитуваат со тест на свиткување со потпирање во четири точки при што се одредува нивната напонско-деформациона состојба и јакост на свиткување.

Зајакнувачкиот дел од хибридните модели е перфориран челичен елемент кој претставува тенок плочест дел со дебелина од 1 mm перфориран со форми во вид на круг. Големината на формите од перфорацијата е променлив параметар во испитувањето, па се добиваат две различни перфорации, кругови со дијаметар 40 mm и кружни облици со дијаметар 60 mm. Распоредот на облиците е ист за двете перфорации (слика 6.3).

За изработка на врската помеѓу стаклениот елемент и челичниот лим користено е конструктивно лепило. На располагање беа два типа на лепила од фирмата Dow Corning тип DC3140 и DC3145. Типот DC3140 претставува лепило составен од една компонента, (Polydimethylsiloxane) на база на силикон еластомер. Лепилото DC3145 пак, претставува еднокомпонентно лепило на база на силикон и гума со зголемена затегачка јакост и елонгација при мали напони. И двата типа на лепила се транспарентни и при нивно аплицирање не се користат прајмери или дополнителни средства за зацврстување (UV – светло, зголемени температури и сл.).

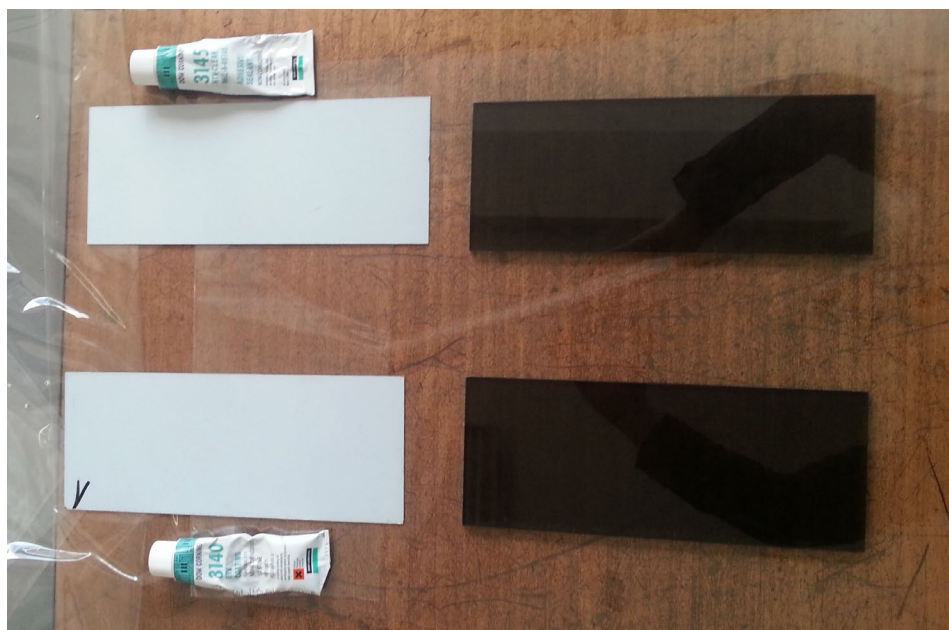


Слика 6.3: Изглед на перфорираните челични делови

Со цел да се направи соодветен избор на лепило, пред самото формирање на хибридните модели направени беа пробни испитувања на свиткувае на врски добиени со двата достапни типа на лепило. Испитани беа мали елементи од стакло и челичен лим со димензии 120 mm x 200 mm (слика 6.4) со што беше одредена способноста на лепилото да се користи за површинско поврзување на делови и можноста да се добие тенок слој од лепило. Површинското поврзување подразбира користење на лепило кое лесно се наносува на површината со што ќе се оневозможат грешки од видот на заробени воздушни меури кои понатаму би претставувале ослабено место во врската и пречки во делувањето на целокупниот модел како композит. Уште поважно, површинското поврзување бара користење на лепило кое брзо и целосно зацврстува по целата површина на кое е нанесено. Од друга страна, лепилото кое треба да се користи треба да има задоволителна густина и

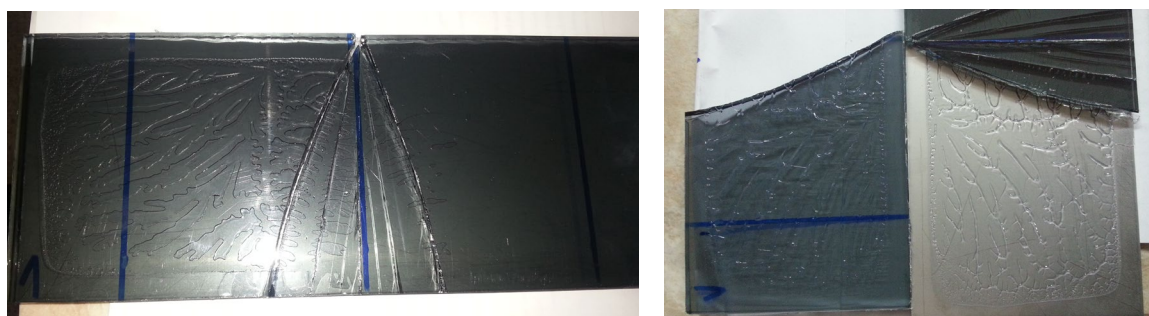
вискозност за да може да се нанесе во тенок слој. Предложениот концепт предвидува дебелина на лепилото не поголема од 1 mm.

И двата употребени типа на конструктивно лепило зацврстуваат во присуство на воздух и влага. По направените испитувања утврдено е дека лепилото DC3145 кое има подобри механички карактеристики е лепило кое има поголема густина и потешко се нанесува во тенок слој.



Слика 6.4: Подготовка на малите модели

Дополнително, овој тип на лепило покажа полоши карактеристики во однос на зацврстувањето (слика 6.5). Имено, кај моделот каде што беше користено ова лепило средишниот дел од моделот и по неколкудневна сушење не успеа да зацврсне поради отсуство на воздух предизвикано од зацврнатите краеве.



Слика 6.5: Моделот со употребено лепило DC3145 по испитувањето

Моделот со типот на лепило DC3140 покажа послаби механички карактеристики на лепилото, меѓутоа технолошките карактеристики ги исполнија критериумите споменати на почетокот за добивање на соодветна врска во композитот. Ова лепило има задоволителна густина која овозможува полесно нанесување на површината, добивање на потенок слој од врзен спој како и намалени грешки при лепењето (слика 6.6).



Слика.6.6 Моделот со употребено лепило DC3140 по испитувањето

По направените тестирања, за изработка на хибридните модели избран е типот на лепило DC3140 кој ги задоволи потребните критериуми со своите механички, физички и технолошки карактеристики (табела 6.1).

Табела 6.1. Својства на лепило DC3140

Својство	Мерна единица	Вредност
Боја		транспарентна
Време на зацврстување - 0,5mm слој	часови	24
Време на зацврстување - 3,2mm слој	часови	72
Време на целосно зацврстување -3,2mm слој	денови	7
затегнувачка јакост	МПа	3,1

Прекинувачко издолжување	%	420
-----------------------------	---	-----

Во технологијата на лепење спаѓа и подготовка на површините кои треба да се спојат. Поради перфорацијата на челичниот елемент, неговата површина беше површината на која се нанесува лепилото, за да може да се доведат на минимум можностите за протекување на лепилото низ отворите од перфорацијата. За да се обезбеди соодветна адхезија, површината на челичниот елемент подлежеше на брусење со рачна брусна хартија со фина грубост. Дополнително, бидејќи перфорирањето на елементите беше извршено со плазма, рабовите од самата перфорација беа дополнително третирани со цел да се избегне било каков зарез или остар раб кој би можел да предизвика причина за лом. Кога се работи за поврзување на елементи од стакло и метал, секаков контакт помеѓу двата цврсти материјали мора да биде избегнат. Кај моделите од докторската дисертација, бариерата е слојот од лепило.

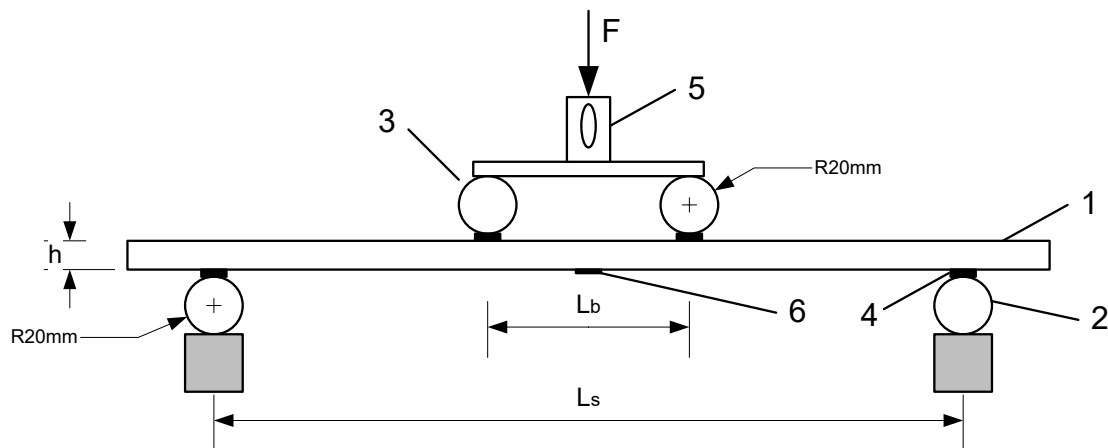
Другата површина која се спојува беше површината на стаклениот елемент. Оваа површина не беше механички третирана, се задржува идеално мазна и хемиски чиста. За обезбедување на чиста површина пред самото лепење претходеше третман со ацетон. Откако беа подготвени површините за лепење, спојувањето беше направено под дејство на сопствената тежина на стаклениот елемент. По зацврснувањето на лепилото следеше фаза на механичко чистење, со остар алат за стакло, на истиснатото лепило по рабовите на моделите, а посебно по локацијата на самите отвори од перфорацијата (слика 6.7).



Слика 6.7: Хибридни модели подготвени за тестирање

6.1.2. МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСПИТУВАЊЕ

Експерименталните испитувања се направени според стандардот *EN1288-3:2000* кој го опфаќа испитувањето на елементи од стакло со методот на свиткување со потпирање во четири точки (слика 6.8)[3]. Според препораките на стандардот, потпирањето на парчињата е на константна должина од централната оска на парчињата $L_s = 1000\text{mm}$. Должината на која се поставени притиснувачите L_b е исто така дефинирана во стандардот и изнесува 200mm . Дебелините на испитуваните стаклени елементи h , во овој случај претставуваат променлив параметар. Бидејќи овој стандард дефинира испитувања на рамнински плочести елементи од стакло, и хибридните модели предложени во докторската дисертација се испитувани во целост под условите предвидени во стандардот.



Слика 6.8: Свиткување со притискање во 4 точки

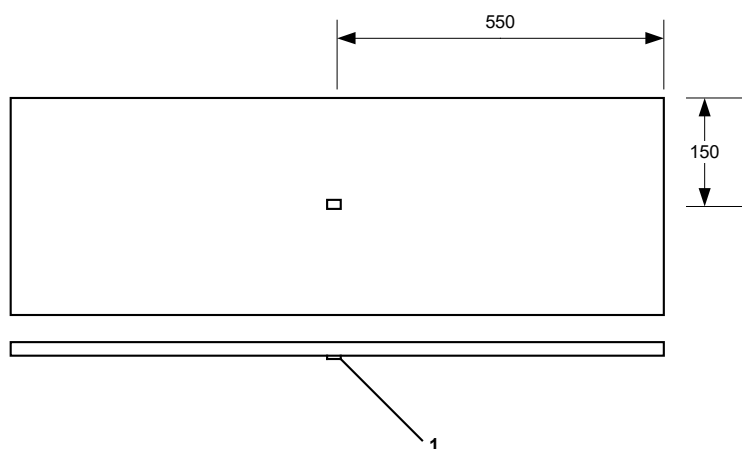
1. Пробно парче 2. Потпирачи 3.Притиснувачи 4. Гумени ленти 5.Мерач на сила 6. Локација на мерни ленти

Уредот кој што е користен во текот на експериментот е универзална машина за испитување на материјали ZWICK ROELL Z250 со можности за максимално оптоварување од 250 kN . Во склоп на истата се наоѓаат соодветните потпирачи и притиснувачи кои се потребни за овој тест. Во конструкцијата на овие делови од машината постојат зглобни врски кои треба да обезбедат паралелен допир по линија на површината на стаклениот елемент кој се испитува. Со ова се гарантира рамномерно нанесување на аплицираната

сила и се избегнува појава на локални напонски концентрации поради ексцентрично оптоварување. За да се избегне директен допир на челичните делови од машината и стаклото и да се доведе можноста за триење на минимум, на самите потпирачи и притиснувачи поставени се тенки неопренски ленти со соодветна тврдина според препораките на стандардот.

Излезните параметри релевантни за извршеното испитување кои се добиени од самиот уред се силата на оптоварување и соодветното поместување. Како и што налага самиот стандард, посебно е отчитана максималната сила на кршење како и поместувањето при истата. Како дополнителни испитувања кај хибридните модели направена е проверка на однесувањето по лом на секое од пробните парчиња при што се добиени соодветните дијаграми на сила- поместување кои го дефинираат капацитетот на преостаната носивост на елементите и по настанат лом. [1]

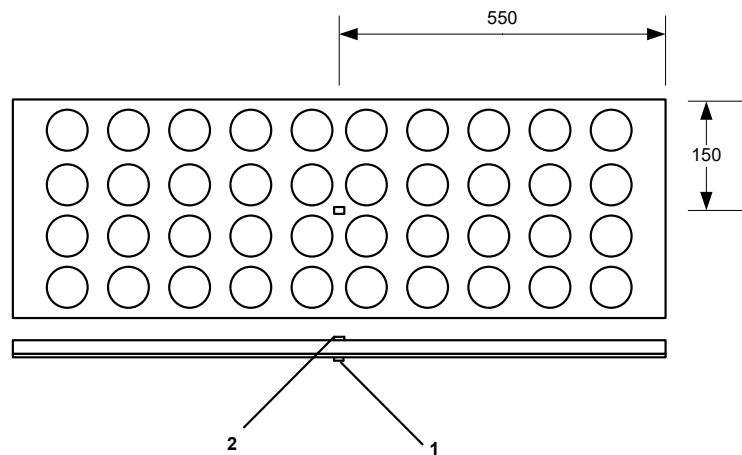
Од друга страна, целта на испитувањата е и добивање на напонската состојба на елементите при аплицираното оптоварување. Со цел да се добијат овие излезни параметри користена е дополнителна мерна опрема, механички давач на поместувањето KYOWA со максимално поместување од 100 mm, поставен на позиција да го мери максималниот угиб на пробното парче, како и мерни ленти KYOWA за одредување на напоните соодветно прикачени на моделите. Кај секое пробно парче мерени се напоните на свиткување и тоа во делот на затегнување (долната страна на парчињата, спротивна од страната на притискање) (слика 6.9). Кај хибридните модели мерени се напоните на делот од стакло и на перфорираниот лим за да се забележи на можната деламинација во делот од парчето кој се наоѓа во подрачјето помеѓу притиснувачите, а кој претставува подрачје од интерес за испитувањето.



Слика 6.9: Локација на поставената мерна лента

1. Мерна лента во зона на затегачки напони

Дополнително, кај еден од секоја варијанта на хибридните модели, поставени се мерни ленти и од горната страна на парчињата за да се провери поместувањето на неутралната оска на напречниот пресек во рамнината на свиткување (слика 6.10). За да се постигне температурна компензаија за секој од моделите користени се соодветни дополнителни паразитски мерни ленти поставени на посебни стаклени и хибридни парчиња од стакло и челик. За процесирање на сигналите од дополнителната мерна опрема користен е мерно засилувачки уред Spider8 од производителот НВМ, кој користи соодветен софтвер catman Easy/AP што служи за аквизиција, визуелизација и анализа на добиените резултати.



Слика 6.10: Локација на поставените мерни ленти

1. Мерна лента во зона на затегачки напони; 2. Мерна лента во зона на напони на притисок

Во првата фаза од испитувањето преку излезните параметри од испитувањето, дефинирани во стандардот, се добиваат механичките карактеристики на свиткување на стаклото кое е користено, односно, големината на носивоста на конструктивниот елемент при оптоварување од надворешна сила чиј правец на дејствување е нормален на површината на моделот (слика 6.11 и 6.12). Според *EN 1288-3:2000* јакоста на свиткување се добива преку образецот дефиниран во овој стандард. Формулата за пресметка ја зема превид максималната сила до лом и дебелината на парчето.

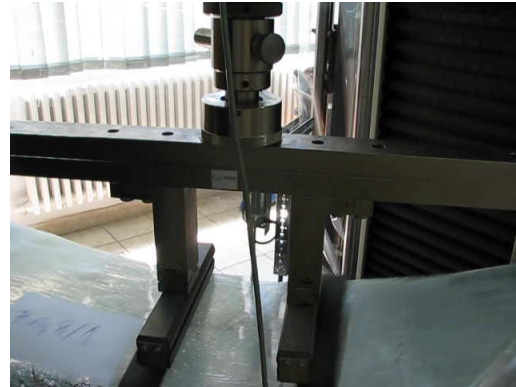
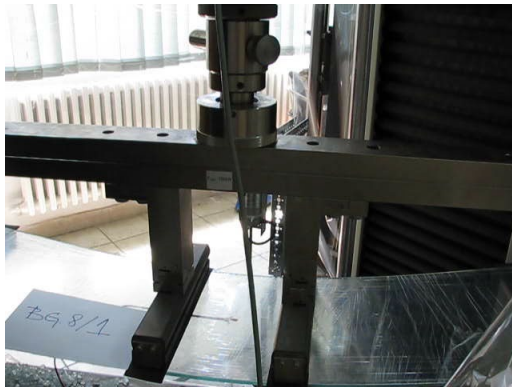
$$\sigma_{bG(BG.8)} = \frac{3 \cdot \rho \cdot g \cdot L_s^2}{4h} = \frac{3 \cdot 2500 \cdot 9.81 \cdot 1^2}{4 \cdot 0,008 \cdot 10^6} = 2,29 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{bG(BG.10)} = \frac{3 \cdot \rho \cdot g \cdot L_s^2}{4h} = \frac{3 \cdot 2500 \cdot 9.81 \cdot 1^2}{4 \cdot 0,01 \cdot 10^6} = 1,83 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{bB(BG.8)} = k \left[F_{\max} \frac{3(L_s - L_b)}{2Bh^2} + \sigma_{bG} \right] = 1 \cdot \left[2680 \cdot \frac{3 \cdot (1000 - 200)}{2 \cdot 300 \cdot 8^2} + 2,29 \right] = 169,79 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{bB(BG.10)} = k \left[F_{\max} \frac{3(L_s - L_b)}{2Bh^2} + \sigma_{bG} \right] = 1 \cdot \left[5070 \cdot \frac{3 \cdot (1000 - 200)}{2 \cdot 300 \cdot 10^2} + 1,83 \right] = 204,63 \text{ N/mm}^2$$

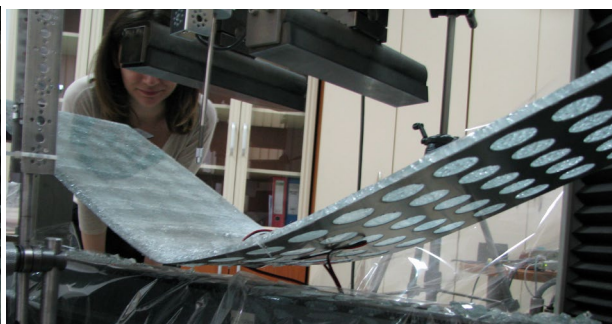
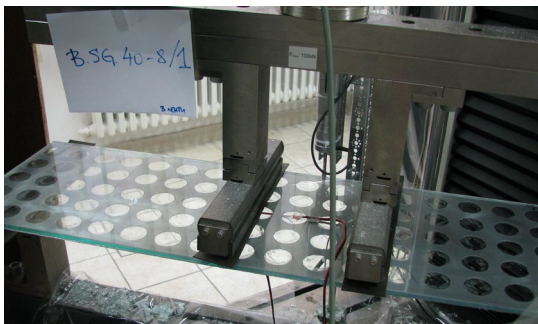
Добиените резултати се однесуваат на калено стакло чијашто специфична напонска состојба по пресекот на парчето дава зголемени механички карактеристики и речиси четири пати поголема јакост на свиткување во однос на обичното силикатно стакло.



Слика 6.11: Пробното парче во текот на испитувањето

Слика 6.12: Момент на лом на пробното парче

Во втората фаза кога се испитувани хибрирдните модели, користени се истите услови на испитување при што се добиваат дијаграмите на сила-поместување до првиот лом, кои ја дефинираат јакосната состојба на елементите и потоа испитувањето продолжува до целосен колапс на елементот со цел одредување на капацитетот на преостаната носивост (слика 6.13).



Слика 6.13: Поставување на пробното парче (лево) и изглед на крајот од испитувањето (десно)

Причина за испитувањето на повеќе пробни парчиња од еден ист вид на модел се сите фактори кои дополнително влијаат на јакоста на свиткување на елементот меѓу кои во случај на испитување со свиткување при потпирање во 4 точки најмногу состојбата на рабовите на парчињата. Сите микропукнатини кои настануваат при самото сечење и дополнителна обработка на рабовите, кои се места од каде и започнува ломот кај овој стандарден метод на испитување (слика 6.11), се причина за намалена јакост на самиот елемент. [2]



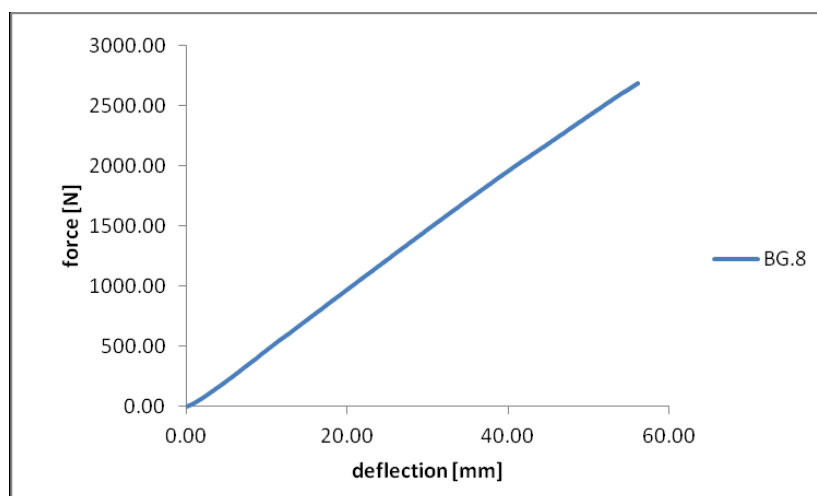
Слика 6.11: Изглед на шемата на кршење специфичен за испитување со потпирање во четири точки

6.2. РЕЗУЛТАТИ ОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИСПИТУВАЊЕ

6.2.1. ДИЈАГРАМИ СИЛА-ПОМЕСТУВАЊЕ

На крајот од изведените испитувања сумирани се резултатите за напонско-деформационата состојба на елементите. За дефинирање на механичкото однесување на елементите формирани се дијаграмите сила-поместување за секоја од групите на модели.

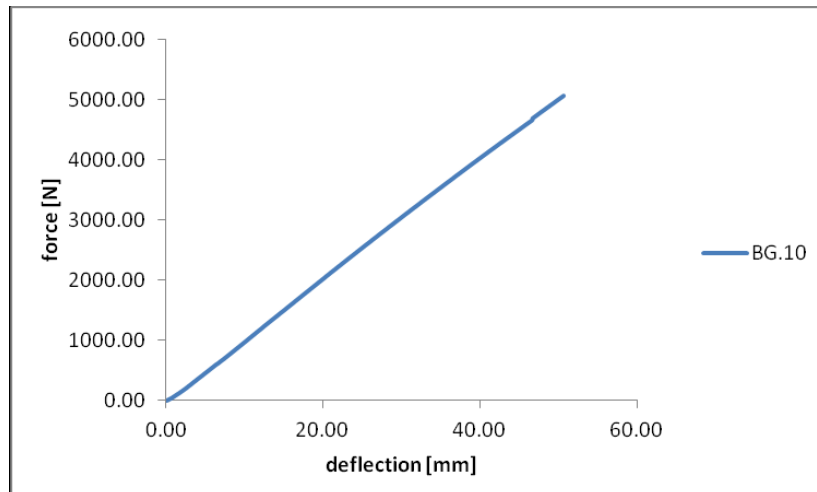
Максималната сила на лом кај пробните парчиња од единечно стакло со дебелина 8mm достигнува близу 2,5kN при соодветни поместувања од 55,5mm во средината на должината на елементот за едниот примерок и 2,7kN и поместување од 60mm за вториот примерок. По анализирање на резултатите добиен е дијаграмот сила – поместување за пробните парчиња BG.8 прикажан во продолжение (слика 6.12) во кој како максимална сила е земена силата на лом од 2,68kN и максимален угиб од 56,1mm.



Слика 6.12: Дијаграм сила – поместување

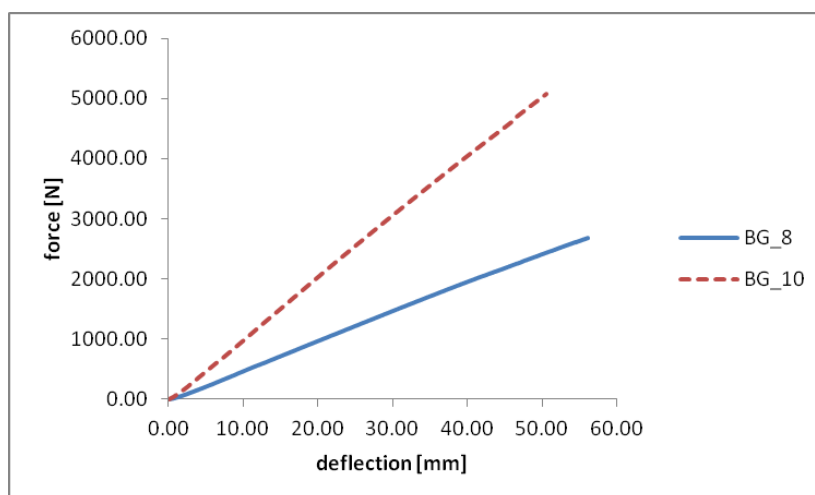
Во вториот дел од првата фаза на испитувањето, испитани се пробни парчиња со дебелина 10 mm, BG.10_3; BG.10_4 и добиени се резултати за јакоста на свиткување на вториот тип на стаклени елементи. Пробните парчиња со поголема дебелина нормална на оската на свиткување очекувано имаат и зголемена јакост на свиткување и зголемена крутост што значи поголема максимална сила и помали очекувани угиби во средината на елементот. Максималната сила при која парчињата доживуваат лом изнесува 5,25 kN за

едниот примерок, при угиб од 52 mm и 4,4 kN за второто пробно парче при измерен максимален угиб 48,4 mm. По завршување на испитувањето добиен е дијаграмот кој е земен за конечен дијаграм на сила – поместување за стаклените модели BG.10. Максималната сила изнесува 5,7 kN при соодветен угиб од 50,58 mm (слика 6.13).



Слика 6.13: Дијаграм сила – поместување

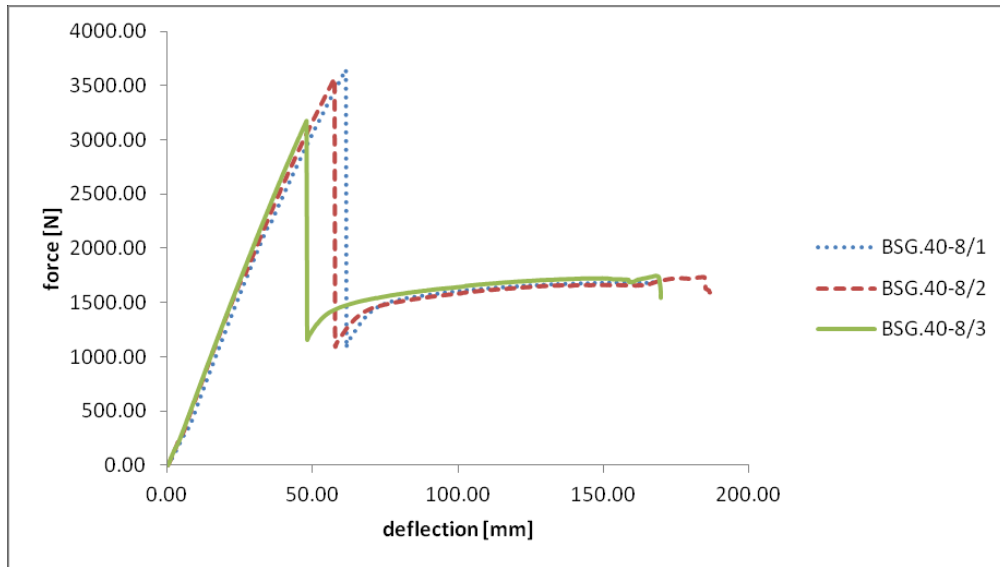
Крутоста на елементот зависи од карактеристиките на материјалот од кој е направен како и од неговата геометрија. Таа е производ од модулот на еластичност на материјалот и аксијалниот момент на инерција на пресекот на елементот. Директно зависен од крутоста на елементот е угибот кој се јавува под дејство на надворешно оптоварување. Доколку направиме споредба на дијаграмите на двата модели (слика 6.14), може да увидиме дека различна е крутоста на елементите, и оваа разлика се должи на различните напречни пресеци. Дополнително, покрутиот елемент односно стаклениот елемент со дебелина 10 mm има поголема јакост и со тоа поголема е максималната сила на лом која може да ја издржи при чисто свиткување. За сметка на поголемата крутост пак, угибот во средината на елементот е помал од вкупниот угиб кој се јавува кај стаклените модели со дебелина 8 mm.



Слика 6.14: Споредбени дијаграми сила - поместување

Дијаграмите сила-поместување за хибридни модели се добиени во втората фаза од испитувањето кога се тестирали четири групи на хибридни модели. Четирите групи се добиени со промена на два параметри, видот на перфорацијата на челичниот елемент и дебелината на стаклениот елемент. Во секоја од групите испитани се по три претставници со цел да се добијат поверодостојни резултати за соодветната група. Прва испитана група се моделите со дебелина на стаклениот елемент 8 mm и перфорација на челичниот елемент во форма на кружни отвори со дијаметар 40 mm. Самото име на групата на моделите BSG.40-8 е формирано на база на овие параметри.

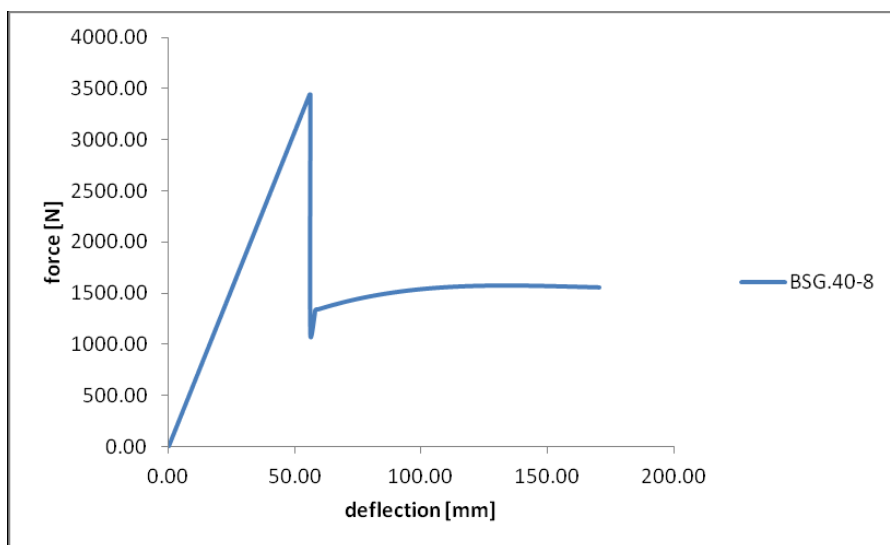
По завршувањето на испитувањето добиени се карактеристичните дијаграми сила - поместување (угиб) и однесувањето на елементот по првиот лом (слика 6.15). Од она што може да се види на дијаграмите по достигнување на максималната сила на лом, силата нагло опаѓа во моментот на кршење на стаклениот елемент за веднаш да почне повторно да расте до конечен лом на целиот елемент. Во првиот дел од дијаграмите се гледа линеарното однесување на композитот, како што и налага карактеристиката на стаклото како материјал. По кршењето на стаклото забележуваме појава на нелинеарност во однесувањето што се должи на карактеристиките на полимерите и челиците како конструктивни материјали. Повторното растење на силата се должи на преостанатата носивост на елементот поради меѓусебно дејство на задржаните парчиња од скршениот стаклен елемент како и на јакоста на челикот од кој е направен перфорираниот елемент.



Слика 6.15: Дијаграми сила – поместување добиени за групата модели BSG.40-8

На прикажаните дијаграми добиени за секој од моделите до губење на целосната носивост, може да се забележи разлика во магнитудата на максималната сила до појава на првиот лом, односно разлика во делувањето на хибридниот елемент како композит. Овие разлики се должат пред се на грешките кои може да настанат при поврзувањето на елементите кога технологијата на спојување се одвива рачно и не се исклучува влијанието на човечки фактор. Грешките кои се јавија во текот на спојувањето беа во форма на заробени воздушни меури или места со помала дебелина на слојот од лепилото. Овие грешки и нивната локација претставуваат места на намалена целокупна јакост, а со тоа и намалување на вредноста на силата која може да ја издржи хибридниот елемент. Од друга страна пак, според наклонот на кривата во првиот, линеарен дел од дијаграмот, може да заклучиме дека крутоста на сите три претставници на групата е речиси идентична. Дополнително од делот на дијаграмот кој се однесува на преостаната носивост на елементот и по првиот лом, може да забележиме дека имаме повторно поклопување на кривите, што само покажува дека во вториот дел од испитувањето, челичниот елемент го превзема оптоварвањето.

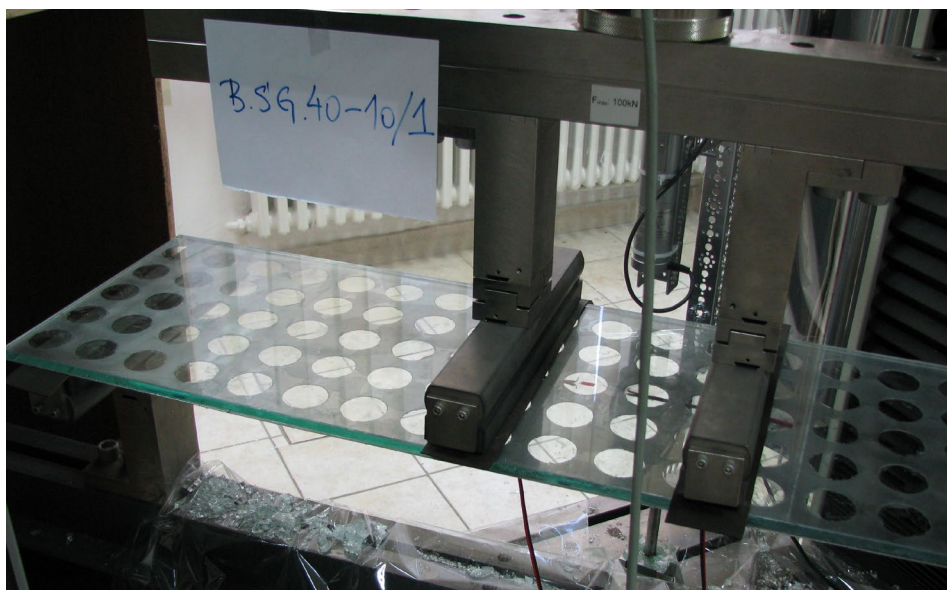
Со цел да се добие споредбена крива која ќе ги претставува карактеристиките на групата модели BSG.40-8, направена е полиномна интерполација на кривите добиени од секој од моделите чијшто резултат е крива од ист вид добиена на база на “средни вредности” и која во понатамошните анализи е земена за крива која ја карактеризира оваа група (слика 6.16). Според оваа крива, максималната сила која се постигнува пред лом на стаклениот елемент е близу 3,5kN, при угиб во средината на елементот од 52mm.



Слика 6.16: Интерполирана крива сила – поместување за моделите BSG.40-8

Во понатамошниот тек на испитувањето кога оптоварувањето го превзема зајакнувањето во елементот, магнитудата на силата повторно се зголемува до 1,5 kN пред целосното губење на носивоста на елементот.

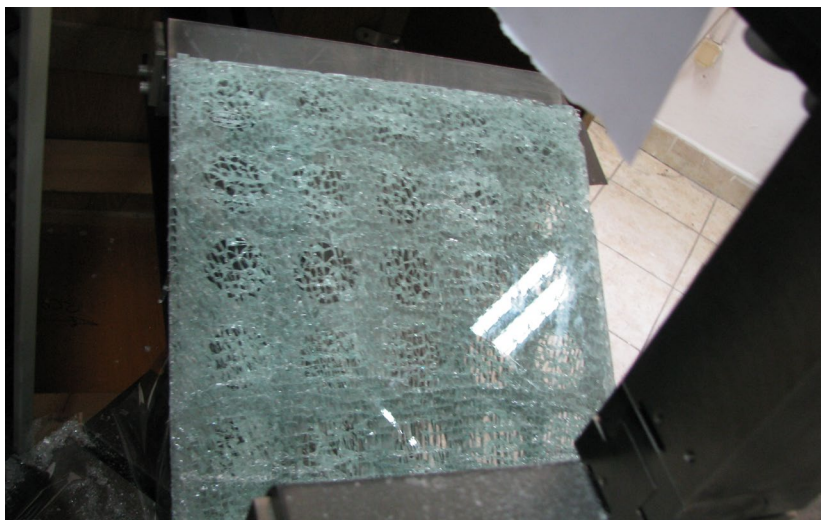
Во продолжение, направени се испитувања за сите три останати групи на модели, под истите услови. Во наредната испитана група BSG.40-10 моделите содржат стаклен елемент со дебелина 10mm (слика 6.17).



Слика 6.17: Поставање на модел од групата BSG.40-10

Кај моделите со зголемена дебелина на стаклениот елемент се очекува зголемување на крутоста, а со тоа намалување на вкупниот угиб на моделот. Кај еден од испитуваните модели, токму поради овој факт, при испитувањето на преостанатата носивост се покажа ослабување на врската помеѓу стаклениот елемент и челичниот лим, кога силите на смолкнување на краевите од ламинираните слоеви станаа доволно големи да предизвикаат релативно поместување на едниот елемент во однос на другиот (слика 6.18). За забележување е фактот што и покрај оваа појава, силата постојано ја зголемува својата магнитуда односно носивоста на елементот не се намалува, а стаклениот елемент остана целосно врзан за челичниот елемент.

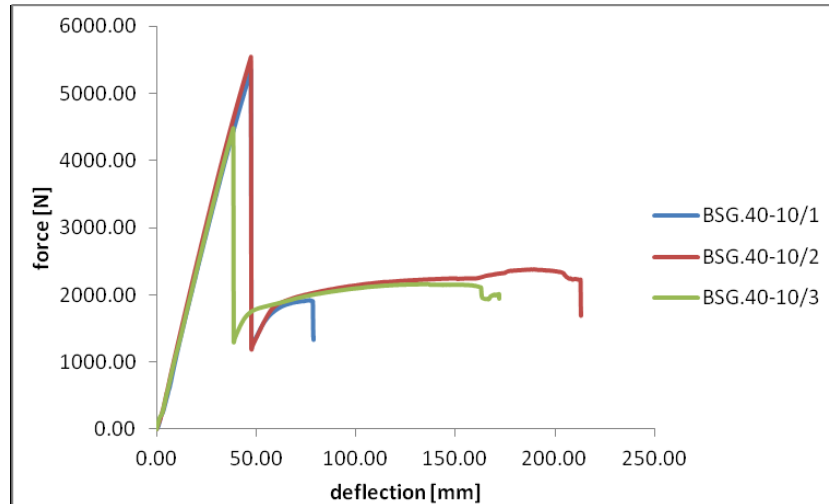
На дијаграмот даден во продолжение (слика 6.19) се прикажани карактеристичните криви сила – поместување за групата на модели BSG.40-10. Од дијаграмите се забележува зголемување на максималната сила пред појава на првиот лом, посебно за вториот испитуван модел. Дополнително може да забележиме зголемување на жилавоста на вкупниот модел и по лом на стаклениот модел. Во контекст на ова, првиот модел од оваа група се издвојува од останатите.



Слика 6.18: "Лизгање" на стаклениот елемент

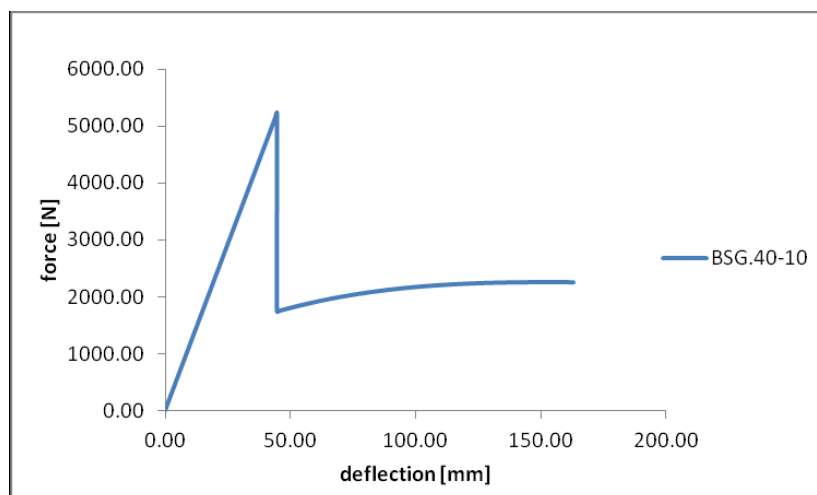
Анализата на примерокот по завршување на испитувањето покажа дека кај овој модел значителна пукнатина на стаклениот модел беше видлива точно на местото на притискање. На истото ова место по ломот на стаклениот елемент при директен допир на притиснувачот и тенкиот челичен елемент, настанува губење на целосната носивост на елементот. Со цел да се добие споредбена крива за оваа група на елементи која во себе ќе

ги земе предвид разликите од трите испитани модели, направена е интерполација на излезните дијаграми (слика 6.19).



Слика 7.24: Дијаграми сила – поместување за моделите BSG.40-10

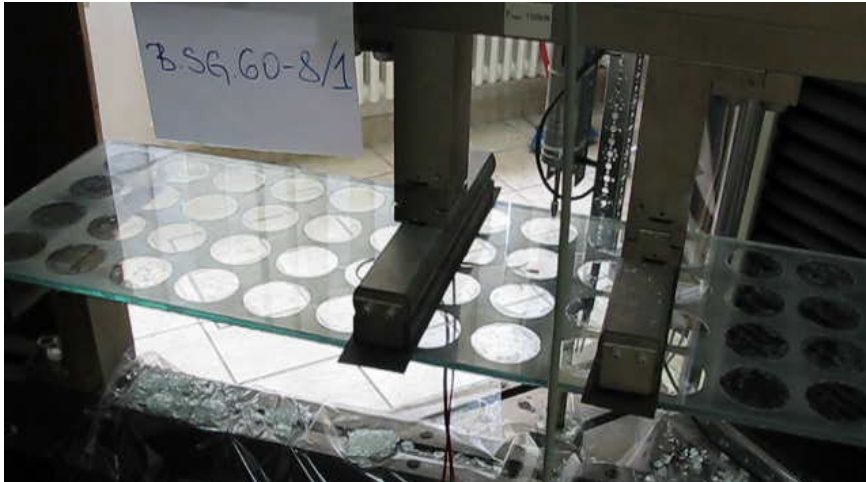
Од карактеристичната крива за оваа група на модели, може да заклучиме дека јакоста е зголемена и максималната сила која може да ја издржат моделите од оваа група пред да настане лом на стаклениот елемент изнесува 5,2kN при угиб во средината на елементот од 48mm. Во однос на преостанатата носивост на моделот по лом на стаклениот елемент, силата повторно се зголемува до 2kN пред губење на целокупната носивост на моделот.



Слика 6.19: Интерполирана крива сила – поместување за моделите BSG.40-10

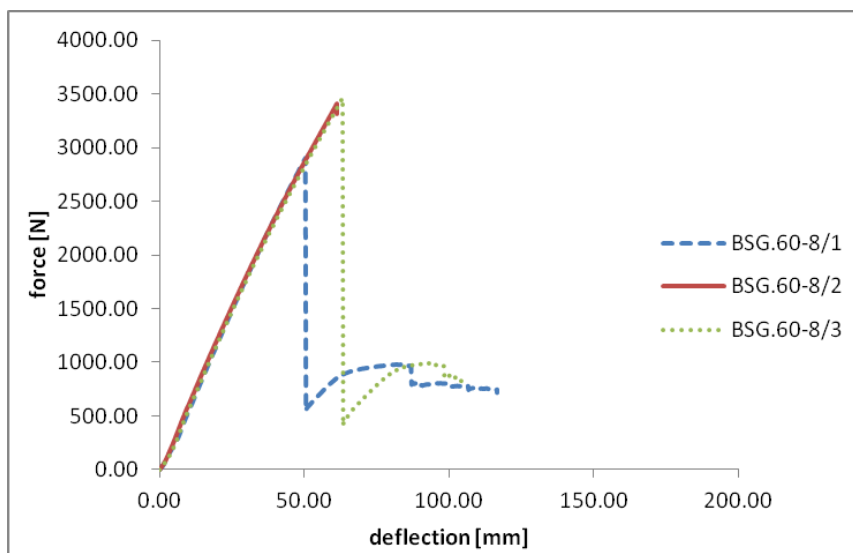
Преостанатите две групи на модели ја имаат перфорацијата на челичниот лим како променет параметар во однос на претходните две групи. Дополнително меѓу себе

се разликуваат во дебелината на употребениот стаклен елемент. Третата група на модели BSG.60-8, го добива своето име според овие два променети параметри, перфорација на челичниот елемент со кружни форми поставени во нормални линии по двете рамнински оски со дијаметар 60mm и дебелина на стаклениот елемент од 8mm (слика 6.20).



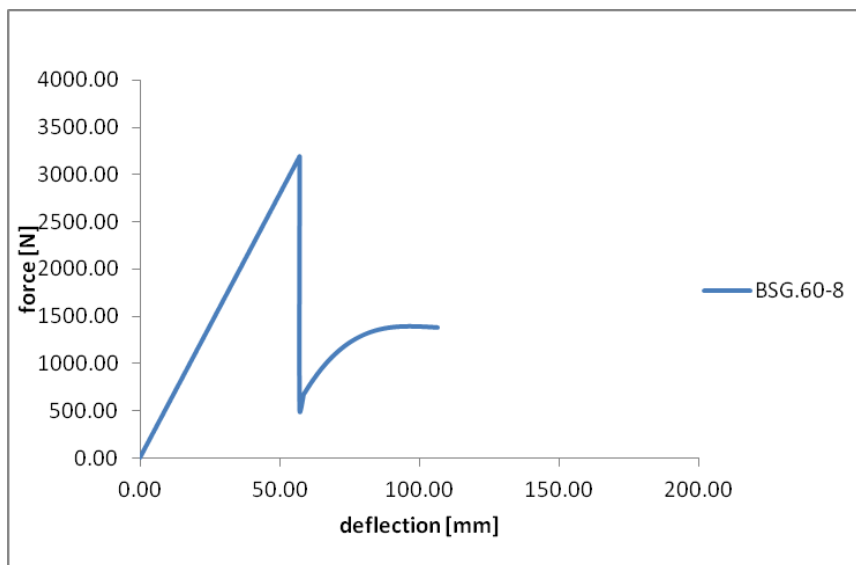
Слика 6.20: Поставување на модел од групата BSG.60-8

Со оглед на тоа дека формите на перфорација се поголеми во однос на претходните две групи, помала е ефективната површина на зајакнување. Токму поради ова, по настанувањето на лом на стаклениот елемент силата се намалува за повеќе од 80% од магнитудата на максималната сила. Ова може да го забележиме и на самите дијаграми добиени од испитувањето (слика 6.21).



Слика 6.21: Дијаграми сила - поместување за моделите BSG.60-8

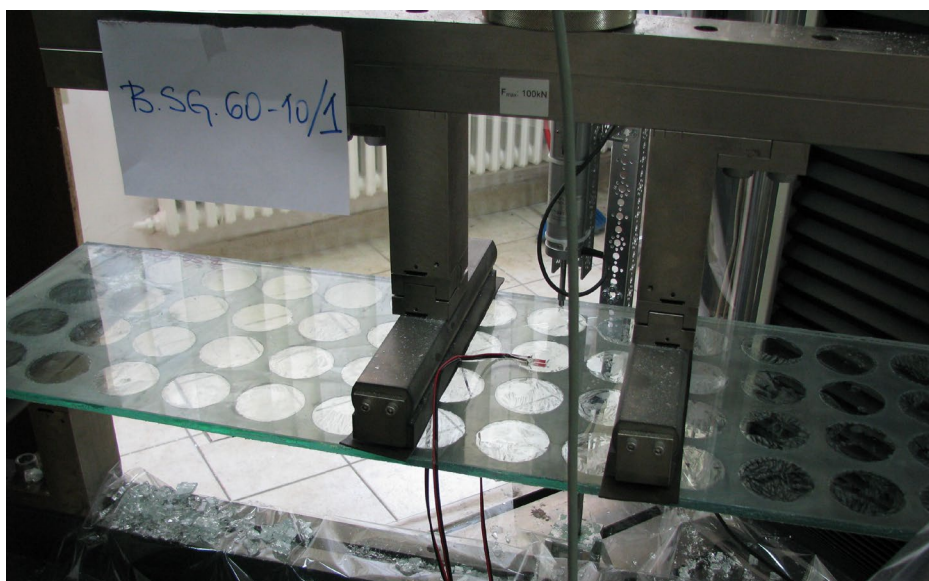
Споредбената крива за оваа група на модели добиена со интерполација е дадена на следниот дијаграм (слика 6.22).



Слика 6.22: Интерполирана крива сила – поместување за моделите BSG.60-8

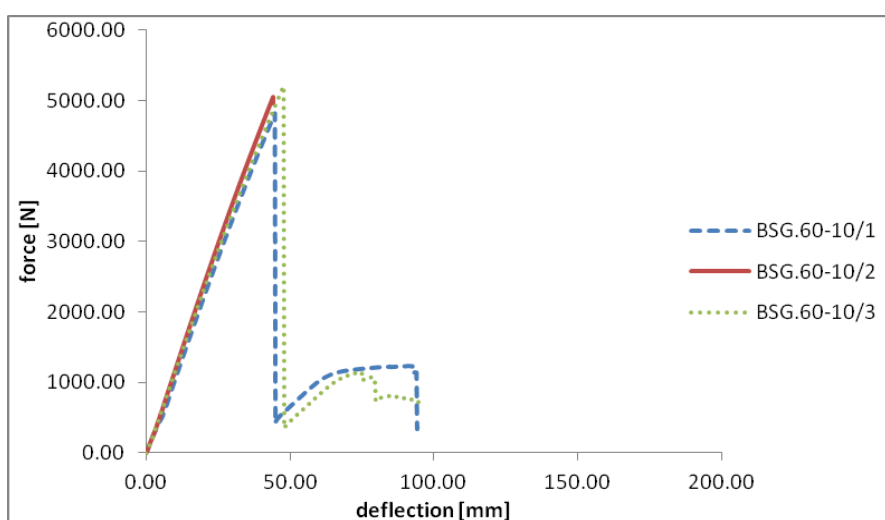
Максималната сила која може да ја издржат моделите од оваа група пред да настане кршење на стаклениот елемент изнесува 3,2kN, при соодветен угиб од 58mm. По настанување на лом вредноста на силата нагло опаѓа до 500N при што оптоварувањето го превзема зајакнувањето и силата продолжува да расте до 1,5kN пред да настане губење на носивоста на моделот (слика 6.22).

Последната група на испитани модели е групата BSG.60-10, каде стаклениот елемент е со дебелина од 10mm (слика 6.23).



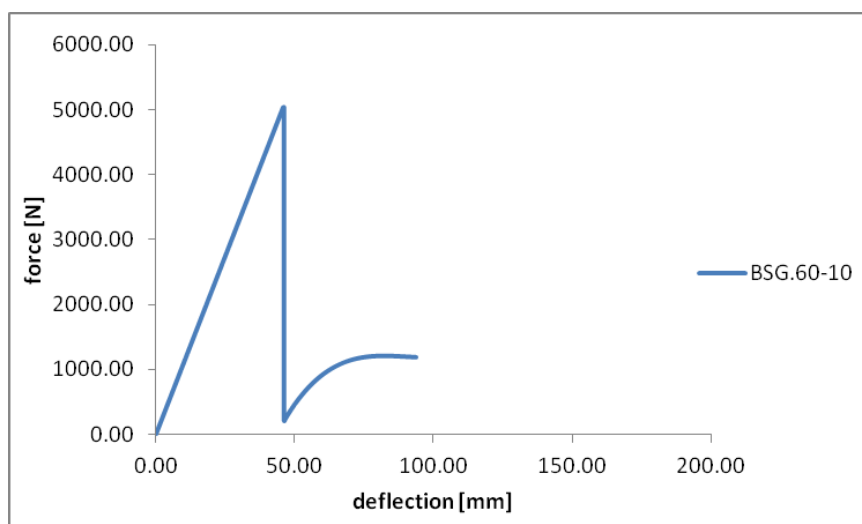
Слика 6.23: Поставување на модел од групата BSG.60-10

Добиените резултати од оваа група на модели се дадени на наредниот дијаграм (слика 6.24). Од дијаграмот може да се забележи мала разлика во максималната постигната сила и во крутоста на моделите. Посебно се издвојува вториот испитан модел во оваа група кај кој поради технологијата на спојување имаше и најголем број грешки. Со испитување на овој модел може да се разгледат и влијанијата на ваквите грешки врз механичките карактеристики на елементот во целост. Освен промената во крутоста на моделот, гршките во спојувањето придонесуваат и до губење на преостанатата носивост на моделот по настанување на лом на стаклениот елемент. Всушност настанатите грешки резултираа во намалување на магнитудата на силата 90% во моментот на кршење на стаклениот елемент. Останатите два модели имаат слични карактеристични криви со голем процент на опаѓање на силата по кршење на стаклениот елемент. Повторното растење на силата што се должи на преостанатата носивост на моделот постигнува вредност близу 1kN пред завршување на испитувањето.



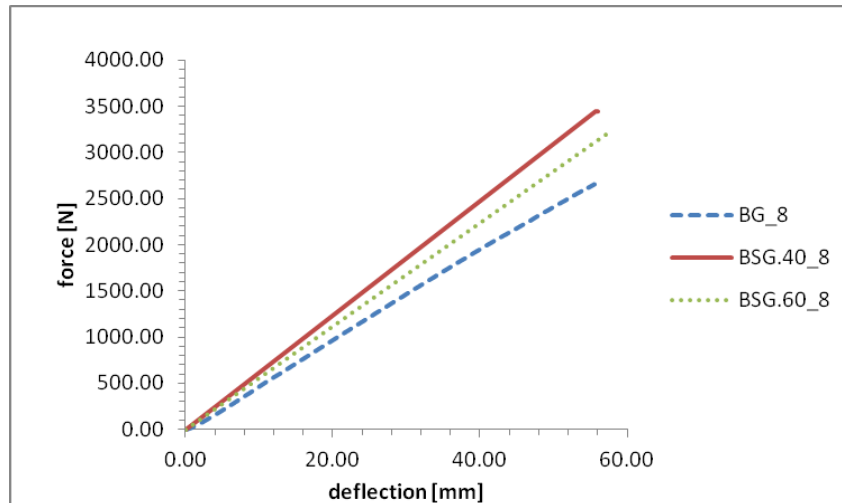
Слика 6.24: Дијаграми сила – поместување за моделите BSG.60-10

Интерполираната крива од групата модели BSG.60-10 е дадена на дијаграм на слика 6.25. Максималната сила која се постигнува кај овие модели е 5kN , при угиб од 47mm по што настанува пукање на стаклениот елемент.



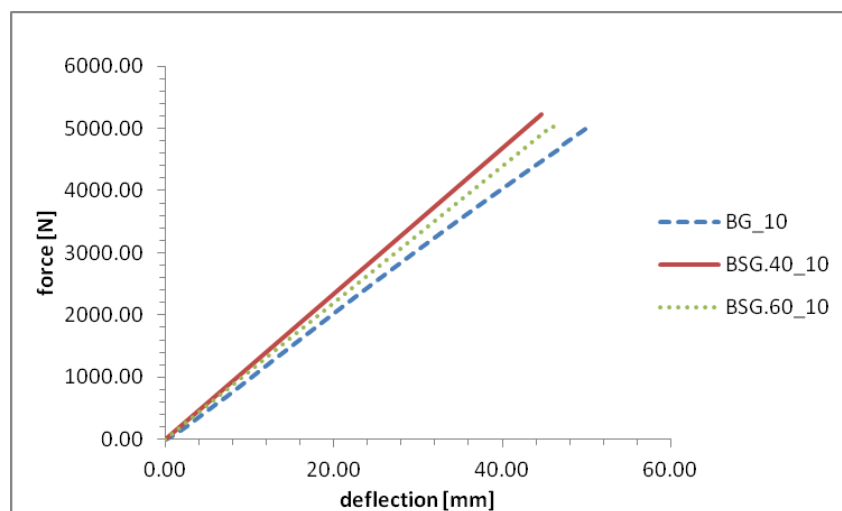
Слика 6.25: Интерполирана крива сила – поместување за моделите BSG.60-10

По завршување на испитувањата направена е споредбена анализа на добиените резултати за утврдување на влијанието на променеливите параметри врз механичкото однесување на моделите. На почетокот направена е анализа на влијанието на големината на перфорација на челичниот елемент (слика 6.26). На дијаграмот дадени се кривите сила-угиб за моделите кои во себе содржат стаклен елемент со дебелина 8mm, како и кривата на испитаниот стаклен елемент со дебелина 8mm. Перфорираниот челичен лим кој претставува зајакнување кај хибридниот модели ја зголемува крутоста на самиот стаклен елемент. Притоа, челичниот лим чија перфорација е со кружни форми со дијаметар 40mm, процентуално содржи повеќе материјал со што очекувано ја зголемува и магнитудата на максималната сила која може да ја издржи хибридниот елемент пред појава на лом на стаклениот елемент. Максималните сили соодветни на различните перфорации на челичниот лим се постигнуваат при речиси иста големина на угибот во средината на елементот. Ова е посебно важно да се земе предвид кога се врши проектирање на конструкција која во себе би го имала овој хибриден елемент.



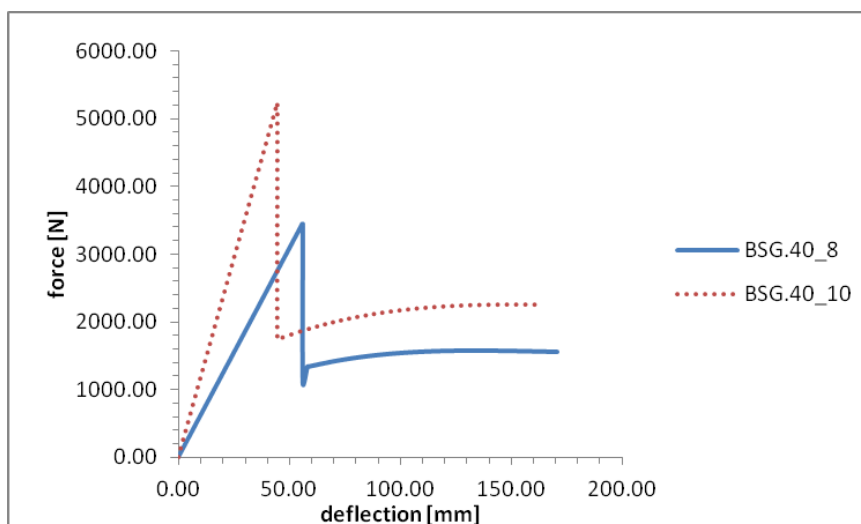
Слика 6.26: Споредбен дијаграм за модели со стаклен елемент со дебелина 8mm

Споредбените дијаграми за моделите кои во себе содржат стаклен елемент со дебелина 10mm се дадени на наредниот дијаграм на слика 6.27. За разлика од претходно разгледаните хибридни елементи, кај елементите кои во себе содржат стаклен елемент со дебелина 10mm може да забележиме дека истото зајакнување предизвикува помало зголемување на крутоста на стаклениот елемент. Дополнително, со воведување на зајакнувачкиот слој се намалува и вкупниот угиб кој се јавува при максимална сила на оптоварување пред појава на првиот лом. Најголема максимална сила се постигнува со зајакнувачкиот слој со помала перфорација.



Слика 6.27: Споредбен дијаграм за модели со стаклен елемент со дебелина 10mm

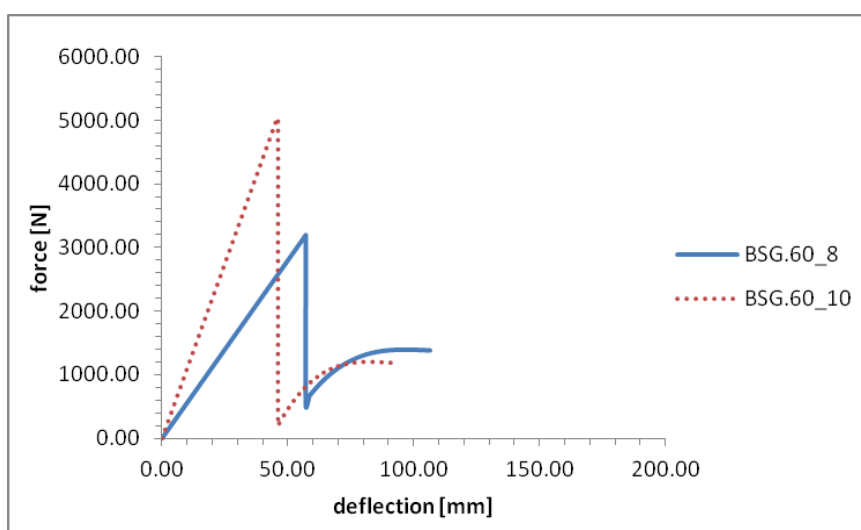
На наредните дијаграми дадени се споредбените криви на хибридни модели на кои се гледа влијанието на дебелината на стаклениот елемент врз флексибилноста на композитот. Дијаграмот на слика 6.28 ги прикажува карактеристичните криви за хибридните модели со перфорација со кружни форми со дијаметар 40mm. Од дијаграмот може да забележиме дека се добиваат криви со иста форма. Бидејќи се работи за зајакнување од ист вид, димензии и перфорација, јасно се гледа влијанието на дебелината на стаклениот елемент во промените на крутоста и јакоста на разгледуваните композити. Иако разликата во дебелините на стаклениот елемент изнесува само 2 mm, зголемувањето на максималната сила со воведување на зајакнувањето е речиси двојно. Значителна е и промената на крутоста на елементите кои имаат зголемена дебелина на стаклениот елемент.



Слика 6.28: Споредбен дијаграм за модели со перфорација со дијаметар 40 mm

Дополнително, од дијаграмите може да заклучиме дека дебелината на стаклото односно самиот стаклен елемент има влијание и по неговото кршење. Имено, ако го погледнеме дијаграмот во делот кој се однесува на преостанатата носивост на моделот по првиот лом, вредноста на силата при кршењето на елементот како и нејзината вредност при понатамошното оптоварување се разликуваат. Што значи дека и во моментот кога реално стаклениот елемент доживува лом и теоретски ја губи својата носивост, поради шемата на лом на калено стакло, сепак има влијание во целокупната носивост на композитот. Врската со која се поврзани стаклениот елемент и неговото зајакнување го обезбедува ова влијание со тоа што ги задржува парчињата од скршениот стаклен елемент. На овој начин, преку нивното меѓусебно дејство, стаклениот елемент сеуште придонесува во носивоста на хибридниот модел.

На дијаграмот на слика 6.29 дадени се споредбени криви за моделите со поголема перфорација, дијаметар на кружните форми 60 mm. За разлика од моделите со помала перфорација, во овие модели влијанието на зајакнувањето врз крутоста на композитот е помало од двојно во сооднос со разликата во дебелината на стаклените елементи. Иако формите на карактеристичните криви се повторно слични, забележителна разлика во однос на претходните модели има во делот на однесувањето на композитот по појавата на лом на стаклениот елемент. Воедно, ако се разгледа кривата на хибридниот елемент со дебелина 10mm, може да се заклучи дека по постигнување на силата на лом, магнитудата на силата опаѓа за повеќе од 95%.



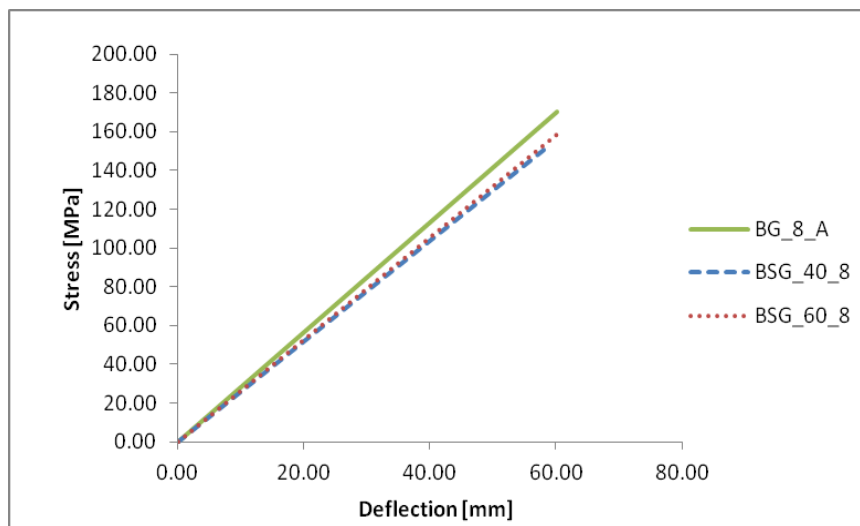
Слика 6.29: Споредбен дијаграм за модели со перфорација со дијаметар 60mm

Повторното растење на вредноста на силата е речиси идентично за двата типа на употребени перфорации. Ова се должи на проецентално помалата ефективна површина на зајакнувачкиот елемент, што укажува на тоа дека доколку се користи поголема перфорација при зголемени дебелини на стаклен елемент, треба да се промени ефективната површина на зајакнувачкиот елемент. Со други зборови во овој случај тоа би значело зголемување на дебелината на зајакнувачкиот елемент со што би се променил отпорниот момент на свиткување на зајакнувачкиот дел, а со тоа и носивоста на композитот што пак ќе влијае на капацитет на превземање на отповарувањето при појава на лом на стаклениот елемент.

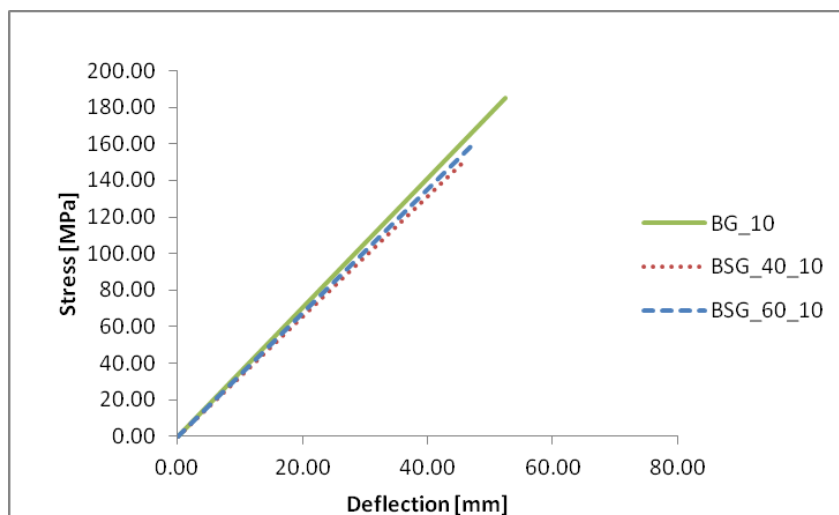
6.2.2. НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИОНА СОСТОЈБА

Целта на предложените концепти на хибридни модели е конструирање на конструктивен елемент од стакло кој преку зајакнување со перфориран челичен елемент ќе придонесе до променета напонска состојба на елементот од стакло, односно намалување на напоните и нивна редистрибуција. Со цел да се утврди влијанието на двата променливи параметри, направени се споредбени анализи на добиените резултати од напонската состојба на испитаните стаклени и хибридни модели.

Првите дијаграми добиени од самата мерна опрема го даваат влијанието на зајакнувачките елементи врз големината на напоните во делот каде моментот на свиткување е најголем односно каде се очекуваа најголеми напони. Вредноста на напоните е споредена во однос на угибот измерен во истата област. Напонската состојба е разгледувана во однос на иста дебелина на напречниот пресек на стаклениот елемент (слика 6.30 и 6.31).

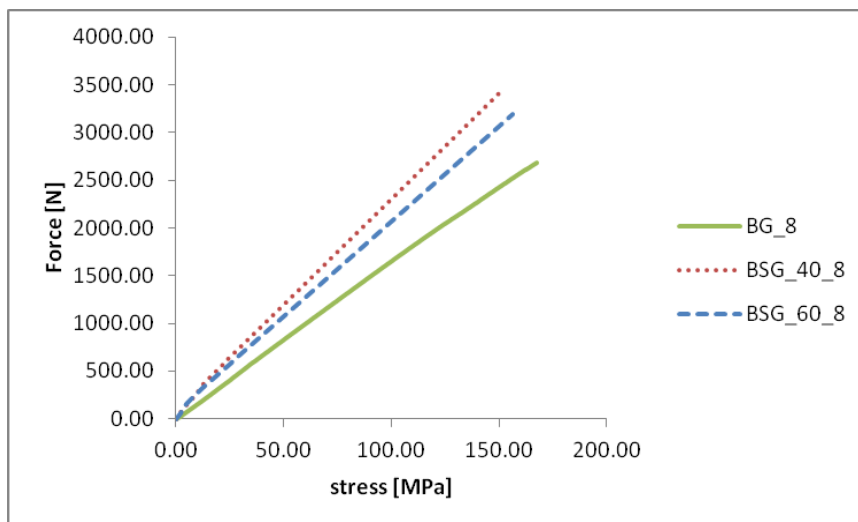


Слика 6.30: Споредбен дијаграм на напонската состојба на модели со стаклен елемент со дебелина 8mm



Слика 6.31: Споредбен дијаграм на напонската состојба на модели со стаклен елемент со дебелина 10mm

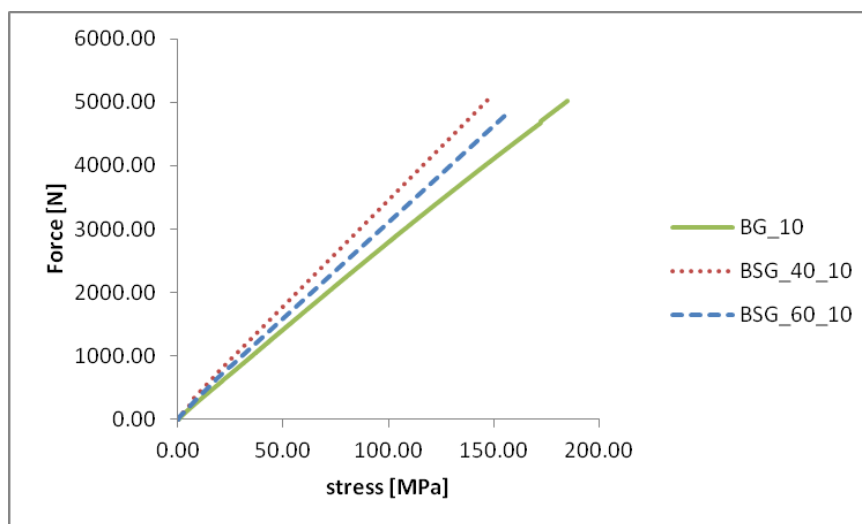
Од она што може да се забележи на дадените дијаграми, влијанието на зајакнувачки елементи со испитуваната перфорација, врз напонската состојба е мало и е во насока на намалување на вредноста на напоните од свиткување. Дополнително може да се забележи дека влијанието на различната големина на перфорација е речиси идентично и за двете испитувани дебелини на стаклото. Со цел подетално да се анализира ова влијание, направени се анализи на напонската состојба овој пат во однос на одредена магнитуда на силата (слика 6.32).



Слика 6.32: Зависност на напоните од магнитудата на силата (стаклен елемент со дебелина 8mm)

Од дадениот дијаграм забележливо е поединечното влијание на различните видови на перфорација кај хибриден модел со дебелина на стаклен елемент 8mm.

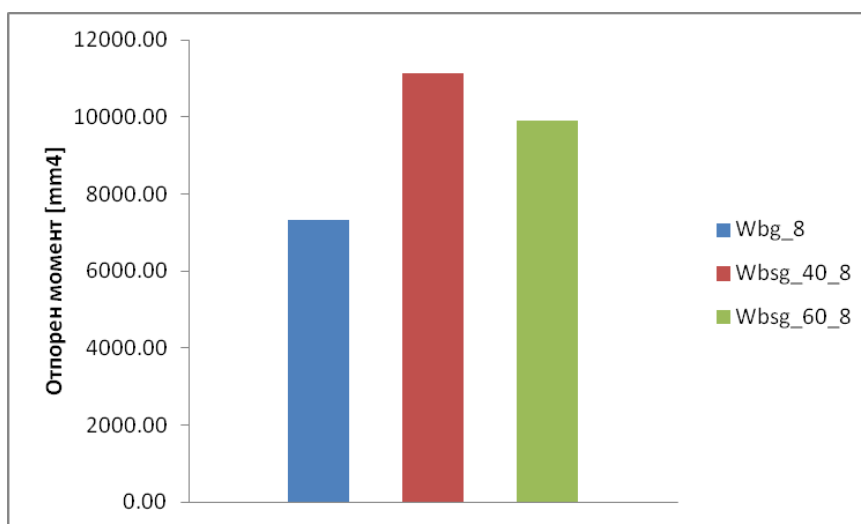
Зајакнувачкото дејство на челичниот елемент со перфорацијата со големина на формите 60mm, се гледа преку намалување на вредноста на напонот од свиткување при иста вредност на аплицираната сила на слика 6.33. Поради поголемата ефективна површина, перфорираниот елемент со помали форми на перфорација има поголемо зајакнувачко влијание, односно во поголем процент ги намалува вредностите на мерениот напон.



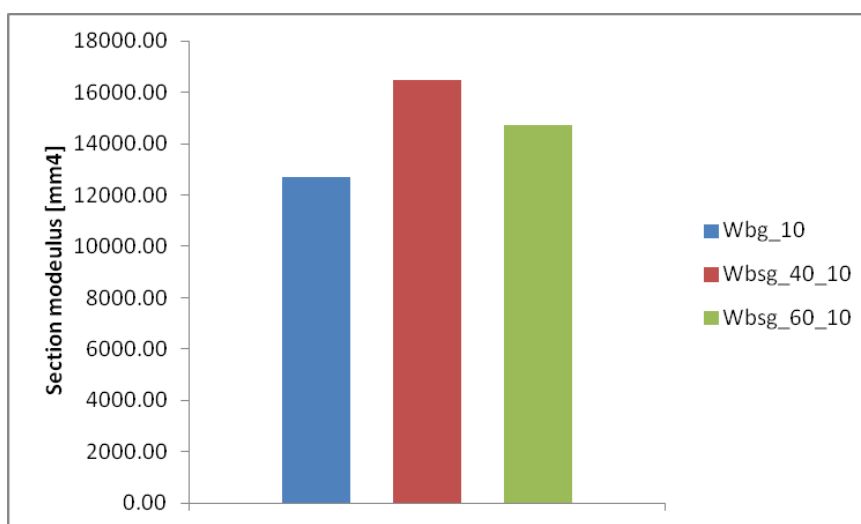
Слика 6.33: Зависност на напоните од магнитудата на силата (стаklen елемент со дебелина 10mm)

Разликата во влијанието на едниот и другиот вид на перфорација посебно се гледа кај хибридните елементи со стаklen елемент со дебелина 10mm (слика 6.33). Ова е резултат на различното влијание на зајакнувачкиот слој и самата врска (дебелина на слојот од лепило) врз отпорниот момент на свиткување на хибридниот пресек. Бидејќи дебелината на зајакнувачкиот слој е константна, промената на отпорниот момент на сложениот пресек се должи на големината на перфорација која е употребена.

Промената на оваа јакосна големина е анализирана врз основа на експерименталните резултати и добиени се следните дијаграми (слики 6.34 и 6.35). Од дијаграмите може да забележиме дека хибридниот модел со перфорација на челичниот елемент од 40mm, нуди и најголем отпорен момент при приложеното оптоварување. Влијанието на оваа перфорација врз отпорниот момент на стаклениот елемент со дебелина 8mm е 34%. Од друга страна, влијанието на перфорираниот челичен елемент врз отпорниот момент на пресекот на стаklen елемент со дебелина 10mm е 23%.



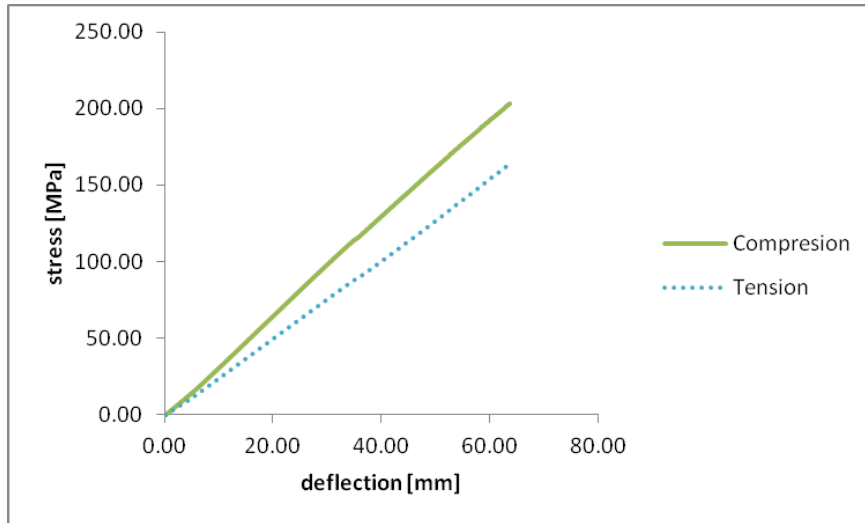
Слика 6.34: Промена на отпорниот момент во пресек на моделите (стаклен елемент со дебелина 8 mm)



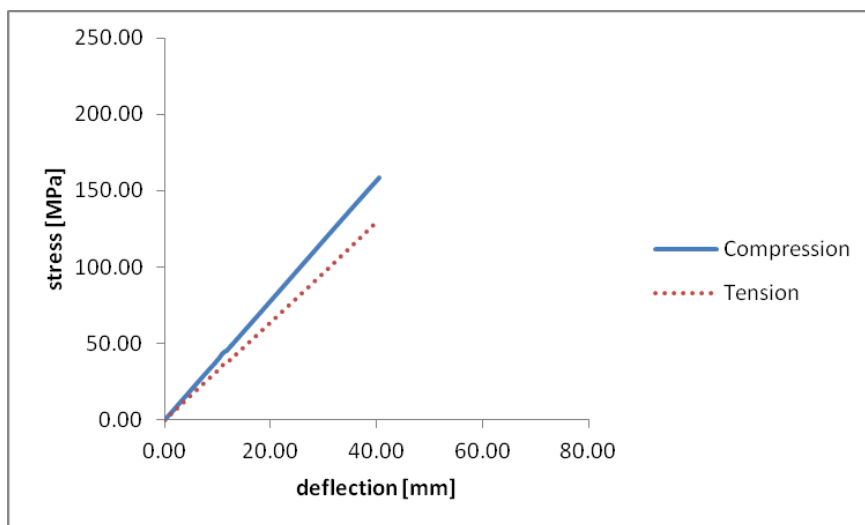
Слика 6.35: Промена на отпорниот момент во пресек на моделите (стаклен елемент со дебелина 10 mm)

Една од промените кај моделите која се воочува при воведување на зајакнувачкиот слој е и поместување на неутралната линија на пресекот. Со цел да се потврди овој факт анализирани се вредностите на напонот на свиткување во зоните на затегнувачки напони и зоните на напони на притисок. Кај едноставен пресек, пресек на стаклен елемент неутралната линија се наоѓа во средината на пресекот и теоретски се очекува појава на напони со иста големина во двете зони. Со поместувањето на неутралната оска кај сложениот пресек се добиваат напони со различна магнитуда во двете мерени зони. На наредните сликите дадени се споредбени дијаграми за измерените напони на свиткување

кај хибридните модели со различна дебелина на стаклен елемент и перфорација на челичен елемент.



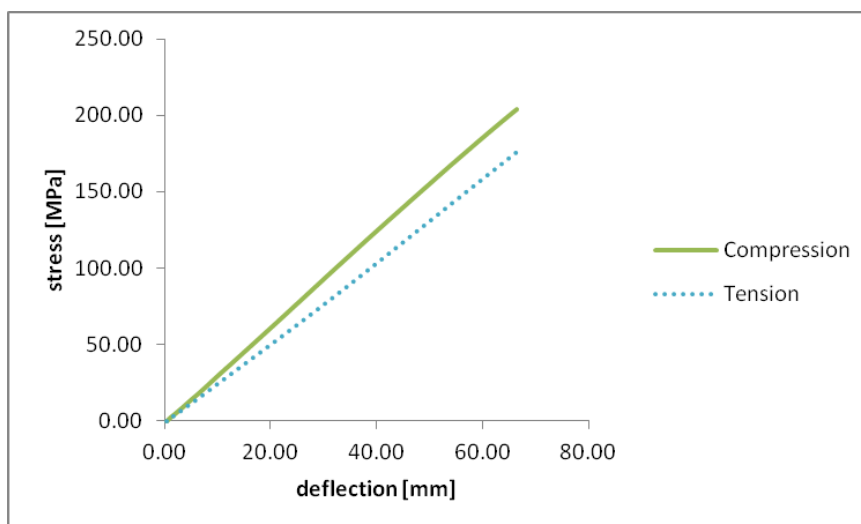
Слика 7.45: Споредбен дијаграм напони на притисок и затегнувачки напони кај моделите BSG.40_8



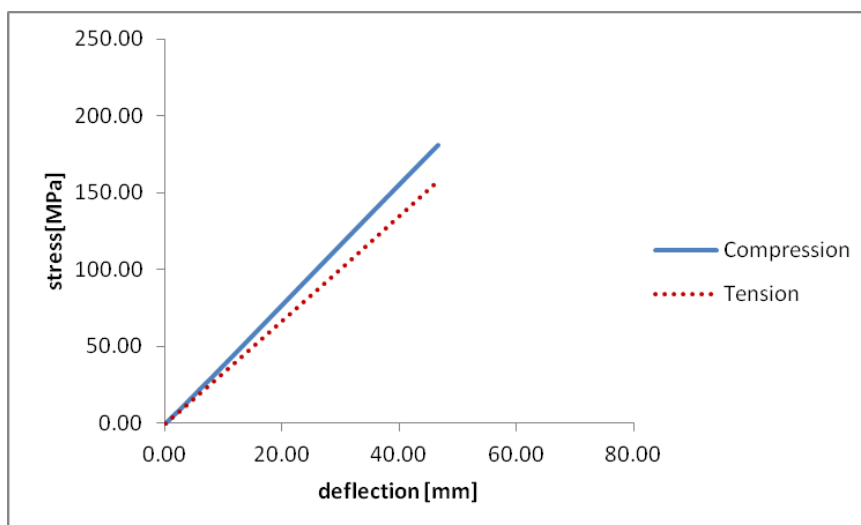
Слика 7.46: Споредбен дијаграм напони на притисок и затегнувачки напони кај моделите BSG.40_10

Она што може да се заклучи од сликите е видливо поместување на неутралната оска кај пресекот на хибридните елементи, преку отклонување на кривите на напоните една од друга. Според прикажаните резултатите (слика 7.45 и 7.46) перфорацијата со помали димензии на кружните форми кај елементот од стакло со дебелина 10mm има речиси идентично влијание во разликата на напоните во зоната на притисок и зоната на затегање споредено со напречниот пресек каде е вклучено стакло со дебелина 8mm, кое процентувано изнесува приближно 18%.

Во наредните два дијаграми (слика 7.47 и 7.48) кои се однесуваат на хибридни елементи со перфорација со кружни форми од 60mm, влијанието на перфорацијата врз поместувањето на неутралната линија е помало во однос на претходно разгледуваната конфигурација на хибридни модели. Во овој случај ова влијание изнесува близу 13% во однос на вредноста на напоните во различните зони на напрегања во однос на напречниот пресек на хибридните елементи. Ова влијание сепак е исто во однос и на двете дебелини на елементот од стакло кој е дел од елементот, а се должи на непроменетите дебелини на зајакнувачкиот материјал кој во сите испитувани елементи изнесува 1mm. Малите разлики може да се препишат на дебелината на спојот од лепило кој заради технологијата на спојување не е со загарантирана идентична вредност по целата површина на самиот елементот, а и разгледувана во однос на различни елементи.

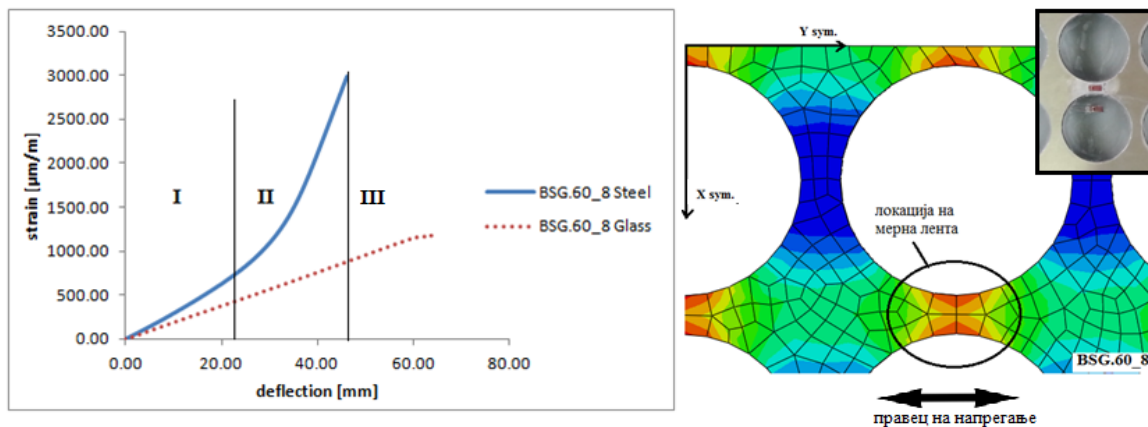


Слика 7.47: Споредбен дијаграм напони на притисок и затегнувачки напони кај моделите BSG.60_8



Слика 7.48: Споредбен дијаграм напони на притисок и затегнувачки напони кај моделите BSG.60_10

Со цел да се контролира врската помеѓу елементите и да се забележи одредено деламинарање на во хибридниот елемент, во средината на елементот, во зоната на затегачки напони беше поставена мерна лента на самиот зајакнувачки елемент. Она што можеше да се забележи од анализата на резултатите, кај хибридните елементи чијашто перфорација има поголеми димензии на формите, каде поради помалата ефективна површина на метал од зајакнувачкиот елемент, се јави одредено ослабување на врската помеѓу елементите (слика 7.49). На дијаграмот може да се забележат разликите помеѓу издолжувањата кои се добиваат од мерните траки поставени на челичниот елемент и на стаклото во истата зона на напрегање.



Слика 7.49: Напонска состојба кај челичниот елемент (BSG.60_8)

Доколку дијаграмот го разгледаме во три посебни фази, во првата фаза се покажува композитното однесување на елементот кога пропорционално на вертикалната деформацијата растат и издолжувањата во правец на напрегањата кај двата елемента поединечно. Во втората фаза веќе се јавува непропорционално зголемување на издолжувањата во челичниот елемент што укажува на нагло зголемување на напоните во елементот односно локално откажување на лепилото. Оваа промена се должи на напонската распределба која се јавува околу отворите на перфорираниот елемент. Од приказот на сликата (слика 7.49) добиен при нумеричкото моделирање може да забележиме дека токму на локацијата на мерната лента се јавуваат и максималните напони во елементот. Во третиот дел од дијаграмот се појавува откажување на мерната лента поставена на челичниот поради надминување на еластичните издолжувања.

Дополнителна причина за појава на овие разлики и локални откажувања на врската помеѓу елементите во композитот се грешките кои се јавуваат како резултат на

технологијата на лепење. На сликата во продолжение (слика 7.50) прикажани се дел од грешките забележани пред самото испитување на физичките модели токму за моделите со поголеми форми на перфорација и дебелина на стакло од 8mm. Овие грешки резултираат во губење на носивоста на врската, а според локацијата повеќето се наоѓаат на места каде напонската состојба покажува зголемени напони во делот околу отворите од перфорацијата.



Слика 7.50: Грешки во слојот од лепило кај хибридните модели BSG.60_8

Со помош на експерименталните испитувања се добиваат механичките карактеристики на физичките модели на предложените концепти на хибридни елементи. Во текот на испитувањата утврдени се голем број на ефекти кои најчесто се резултат на грешки и неправилности кои се јавуваат во текот на формирањето на моделите, меѓутоа кај сите испитани модели измерен е капацитет на зајакнување кој се постигнува преку структурата на хибридните елементи. Резултатите добиени од експерименталните испитувања понатаму се искористени за верификација на нумеричките модели и резултатите добиени од нумеричката анализа на истите.

7. НУМЕРИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ И АНАЛИЗА НА НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИОНАТА СОСТОЈБА

Во оваа глава даден е краток осврт на нумеричкото моделирање и анализа со помош на методот на конечни елементи како метод за истражување на предложените концепти на моделите во тезата. Големото значење на овој метод се должи на можноста нумерички да се претстави било кој процес и истиот да се анализира со симулирање на различни видови на оптоварувања и услови на ограничување. Притоа, концептите се анализираат брзо и ефтино со што овој начин на моделирање станува незаменлива алатка во дизајнирањето и проектирањето на конструкции и делови.

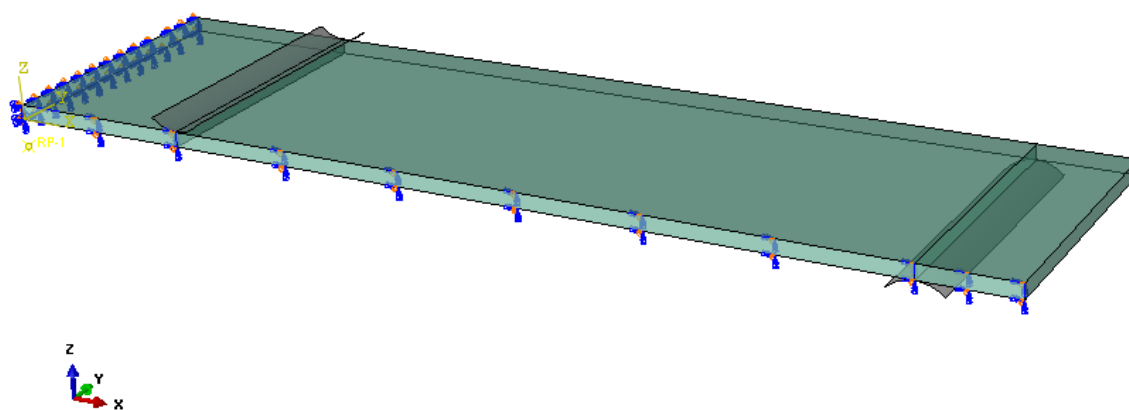
На почетокот, во главата се обработени нумеричкото моделирање и анализата со методот на конечни елементи за елементите кои се предмет на ова истражување. Нумеричкото моделирање и анализата на елементите од стакло и хибридните елементи ги содржи истите влезни параметри дефинирани во експерименталното истражување, вклучувајќи ги реалните гранични услови, надворешно оптоварување и механички карактеристики на употребените материјали. Преку верификација на нумеричкото моделирање со експерименталните истражувања, се потврдува применетиот нумерички метод, при што се дава и осврт на можните проблеми и ограничувања при примена на овој метод. Резултатите од нумеричката анализа се детално разработени и претставени во графички прикази за различни конфигурации, а исто така е направена споредбена анализа и претставени се соодветни графички прикази од споредбените резултати помеѓу експерименталните и нумеричките истражувања.

7.1. МОДЕЛИРАЊЕ СО МКЕ

Со цел да се примени методот на конечни елементи за анализа на предложените концепти, направени се 3Д модели со помош на софтверскиот пакет ABAQUS. Во првата фаза а формирање на мрежата користени се 3Д елементи со осум јазли и некомпатибилна формулација (C3D8I). Во втората фаза направена е анализа со користење на плочести 3Д елементи (SC8R) со цел да се претстави просторниот проблем на свиткување на плоча, а притоа да се искористат предностите на плочестите елемент пред сè во однос на поедноставното и побрзо постигнување на конвергенција кон точно решение. Бројот на јазли кај елементот одредуваат каква ќе биде интерполацијата изведена за решавање на проблемот дефиниран со тој елемент. Користениот софтвер нуди елементи кај кои се користи интерполација од прв или интерполација од втор ред. Крутоста и масата на елементот се пресметуваат нумерички во конкретни точки наречени точки на интегрирање и притоа се користи различен метод на интегрирање. Нумеричкиот алгоритам кој се користи за интегрирање на овие варијабли, влијае врз однесувањето на елементот под конкретни услови. Софтверски пакет нуди елементи со целосна и редуцирана интеграција. Целосна интеграција се користи кога е потребно точно интегрирање на енергијата од деформациите кај неизобличени елементи. [2]

Бидејќи моделите се симетрични по две оски, моделирана е само една четвртина од моделот. За да се дефинира симетријата зададени се гранични услови на симетрија на двата раба соодветно, по x-оската и по y-оската. Дополнително, за да се симулираат ограничувањата од експерименталното испитување, моделирани се еден притиснувач и еден ролер-потпирач и тоа како крути аналитички површини кои поради нивната дефиниција не се мрежираат и заменуваат недеформабилно круто тело во склопот. Едниот ролер е поставен од долната страна на моделот со што се моделира местото на потпирање. Контактот е дефиниран по линија со соодветен коефициент на триење кој треба да го симулира присуството на неопренските ленти поставени да го спречат директниот контакт помеѓу стаклениот елемент и челичните ролери, односно перфорираниот челичен лим и челичните ролери. Истата логика на моделирање е применета и за притиснувачкиот ролер поставен од горната страна на стаклениот елемент. Контактот помеѓу притиснувачкиот ролер и стаклениот елемент се дефинира уште на самиот почеток од формирањето на склопот, контакт по линија при што се овозможува лизгање на површината на стаклениот елемент во однос на заоблената форма на притиснувачот.

Ова е потребно поради деформациите кои се јавуваат кај стаклениот елемент и потребата од постојан контакт помеѓу притиснувачот и стаклениот елемент. Граничните услови понатаму се дефинираат на моделираните аналитички површини. Притиснувачот има дозволена транслација во z-правец и ротација во y-правец. Од друга страна, потпирачот има ограничена транслација во z-правец. (слика 7.1).

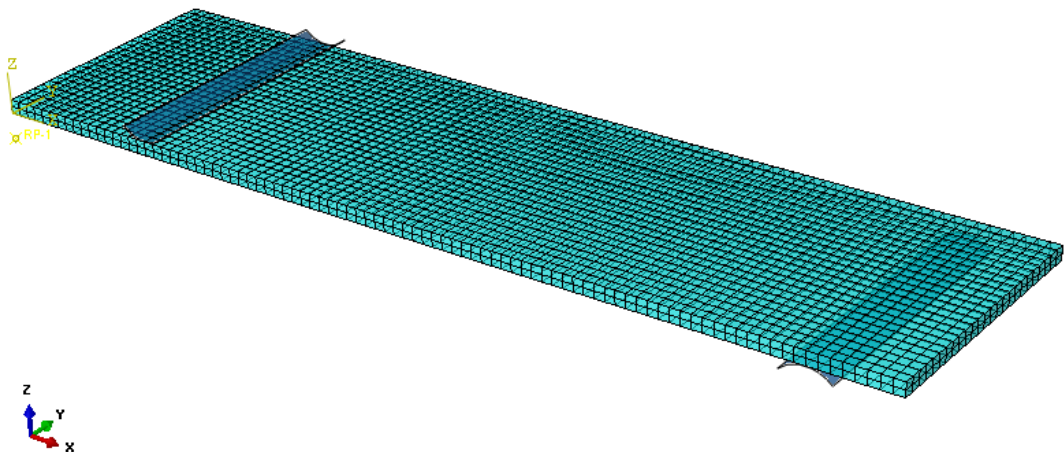


Слика 7.1: Четвртински модел на елемент од чисто стакло

При формирањето на склопот, зададени се површински контакти за трите различни делови, стаклениот елемент, лепилото и перфорираниот челичен лим со што се моделира спојувањето со лепење кое е употребено за изработка на хибридните модели. Материјалите со кои се карактеризираат елементите кои учествуваат во склопот, се дефинирани како линеарно еластични. Еластичноста се моделира со задавање на два параметри, модулот на еластичност E и Поасоновиот коефициент ν . Стаклото е дефинирано со $E_g=70000\text{MPa}$ и $\nu_g = 0,22$, челикот $E_s=210000\text{MPa}$ и $\nu_s = 0,3$, лепилото $E_a=11,5\text{MPa}$ и $\nu_a = 0,48$ [1]. Оптоварувањето од уредот со кој се делува на моделите се задава преку притиснувачот и тоа поради контрола на резултатите на два начини, со контрола на поместувањето и со контрола на силата на делување. Во текот на изведувањето на структурната анализа пресметките се вршат во линеарно подрачје односно до лом на стаклениот елемент. Сепак, во анализата се внесува нелинеарност, геометриска нелинеарност кој мора да се земе предвид поради големите деформации кои настануваат во моделот под дејство на аплицираната сила. Како резултат од анализата се превземаат вредностите на напоните во конкретен конечен елемент од елементот од стакло

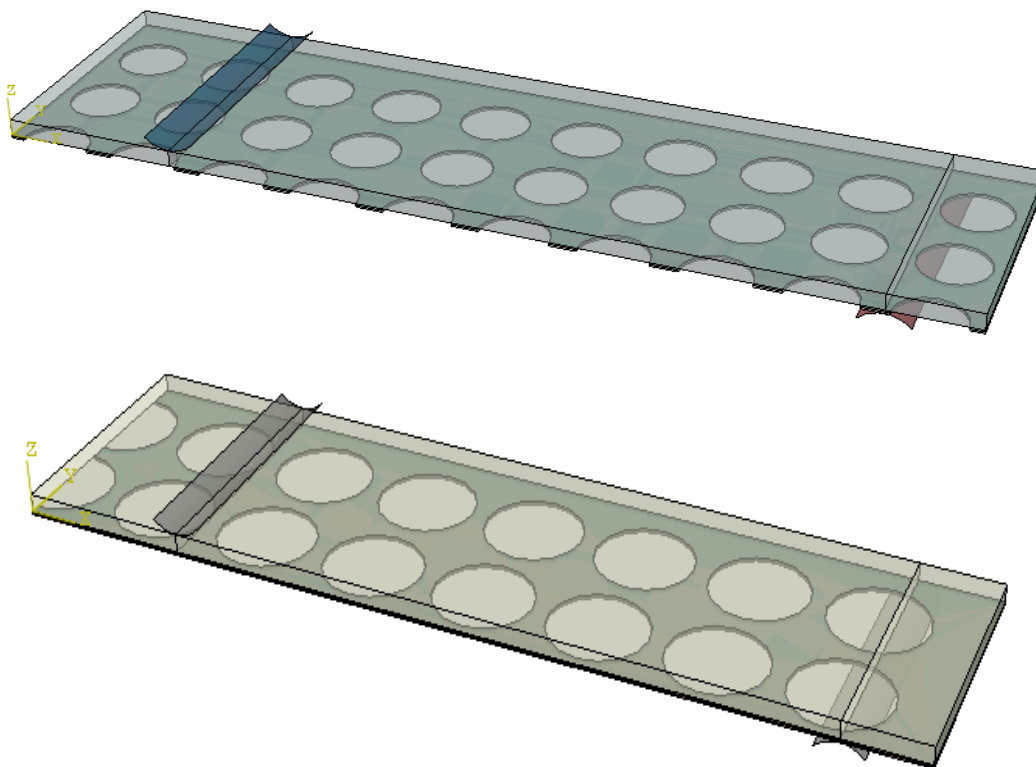
(локацијата на мерната лента од експерименталното испитување) како и магнитудата на неговата деформација..

На почетокот моделирани и анализирани се елементи од стакло кои се користат во хибридните модели како што е направено и во експерименталното испитување. Бидејќи се работи за напрегање од чисто свиткување во областа која е релевантна за разгледување од самиот елемент, за формирање на мрежата се користат конечни елементи кои се најсоодветни за моделирање на вакво напрегање и кај кои се избегнува ефектот на „shear locking“ кој понатаму може да спречи конвергенција на решението од анализата. Со цел да се пресметаат и прикажат соодветно напоните во двете карактеристични зони на напрегање, зона на затегачки напони и зона на притисок, конечните елементи се дефинирани во два слоја во мрежата по дебелината на стаклениот елемент, додека во случајот кога се користат плочести 3Д елементи, мрежирањето е направено во еден слој (слика 7.2).



Слика 7.2: Модел прикажан преку конечни елементи (C3D8I)

Во продолжение даден е приказ на изгледот на хибридниот модел кој исто како и моделите од чисто стакло, моделиран е во четвртински модел поради симетријата по двете оски (слика 7.3). Поради споредба на приказот се дадени модели со различен вид на перфорација на зајакнувањето и иста дебелина на стаклениот елемент како што се анализирани и експериментално.

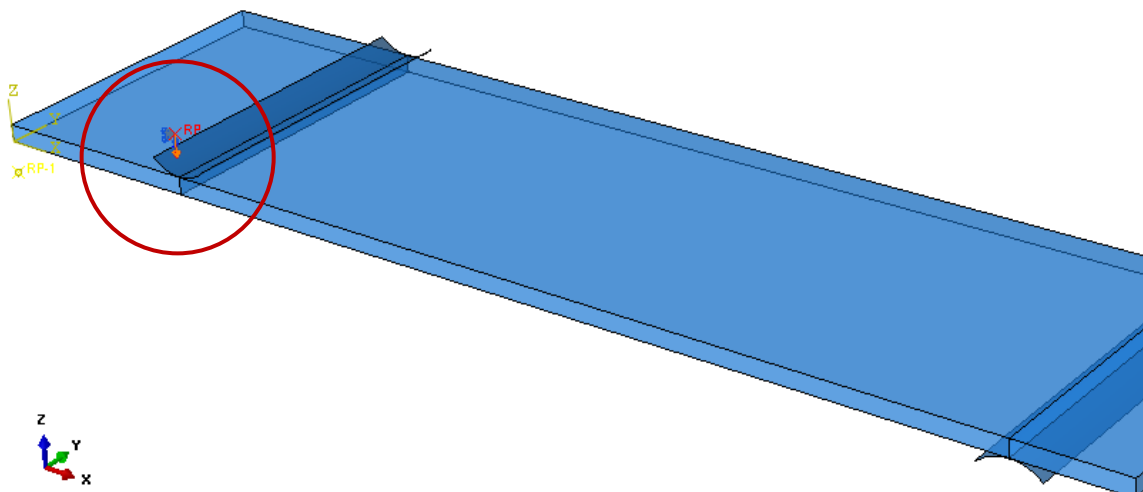


Слика 7.3: Четвртински хибридни модели со различна перфорација

7.2. АНАЛИЗА НА РЕЗУЛТАТИ ОД НУМЕРИЧКОТО МОДЕЛИРАЊЕ

Нумеричката анализа на моделите опфаќа статичка анализа со која се дефинираат условите под кои е изведено експерименталното испитување кое се симулира. Притоа симулирано е оптоварувањето преку задавање на сила која константно расте до максимална вредност за краток временски интервал

Задавањето на силата како надворешно оптоварување се прави преку аналитичките површини кои ги претставуваат притиснувачите од уредот за испитување во насока на z – оската и во негативен правец во однос на поставениот координатен систем. (слика 7.4).

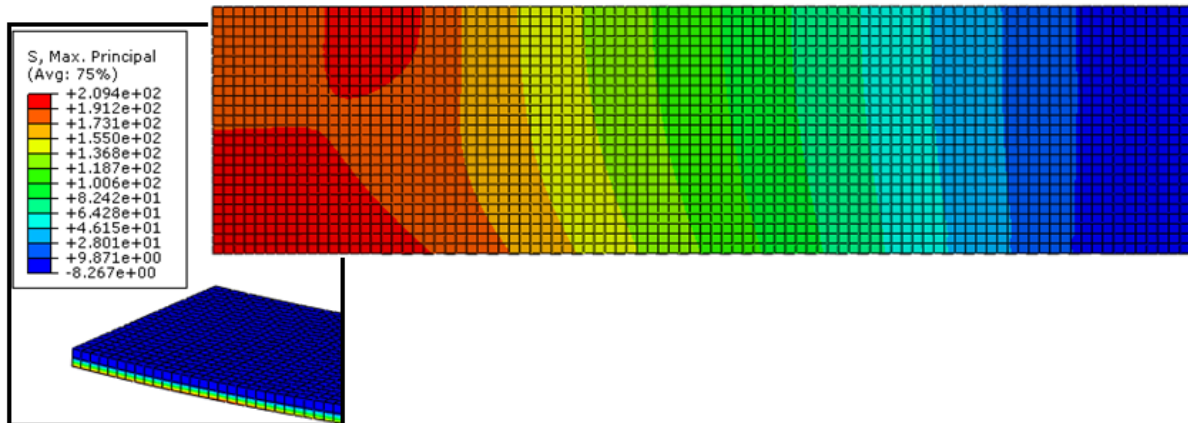


Слика 7.4: Аплицирање на надворешното оптоварување

Откако се формирани моделите се дефинира структурна анализа од која се добива резултат за излезните големина, настанати напони и деформации на моделот. Во решението ги отчитуваме резултатите од конкретниот конечен елемент чијашто позиција претставува локацијата на мерната лента од зоната на затегнување поставена кај експерименталните модели. Ова дава можност за споредба на напонската состојба во иста локација од стаклениот елемент. На слика 7.5 прикажани се резултатите добиени за напонската состојба на стаклениот панел под дејство на сила нормална на неговата средна рамнина.

Од она што може да се забележи на деформираната контура, точно се одделени различните зони на напрегања во моделот во однос на свиткувањето, зона на притисок и ниски напони во горниот дел од панелот и зона на затегнување и високи напони во долниот дел од панелот. Од вториот дел на приказот каде е претставена зоната на затегнувачки напрегања, може да се забележи област на концентрирани зголемени напони близу работ на парчето што реално и се очекува и при експерименталното испитување. Ова е местото и каде се очекува иницијацијата на пукнатините во стаклениот елемент, односно по работ на парчето во областа помеѓу двата горни потпирачи (притиснувачи). [3].

Втората излезна големина од анализата се деформациите во елементот, поточно наклоните кои се јавуваат при свиткувањето. Како релевантна вредност во споредбените резултати се зема вредноста на наклонот во средината на плочата и тоа преку конкретен конечен елемент кој се наоѓа на локацијата на мерната лента поставена на физичките модели.



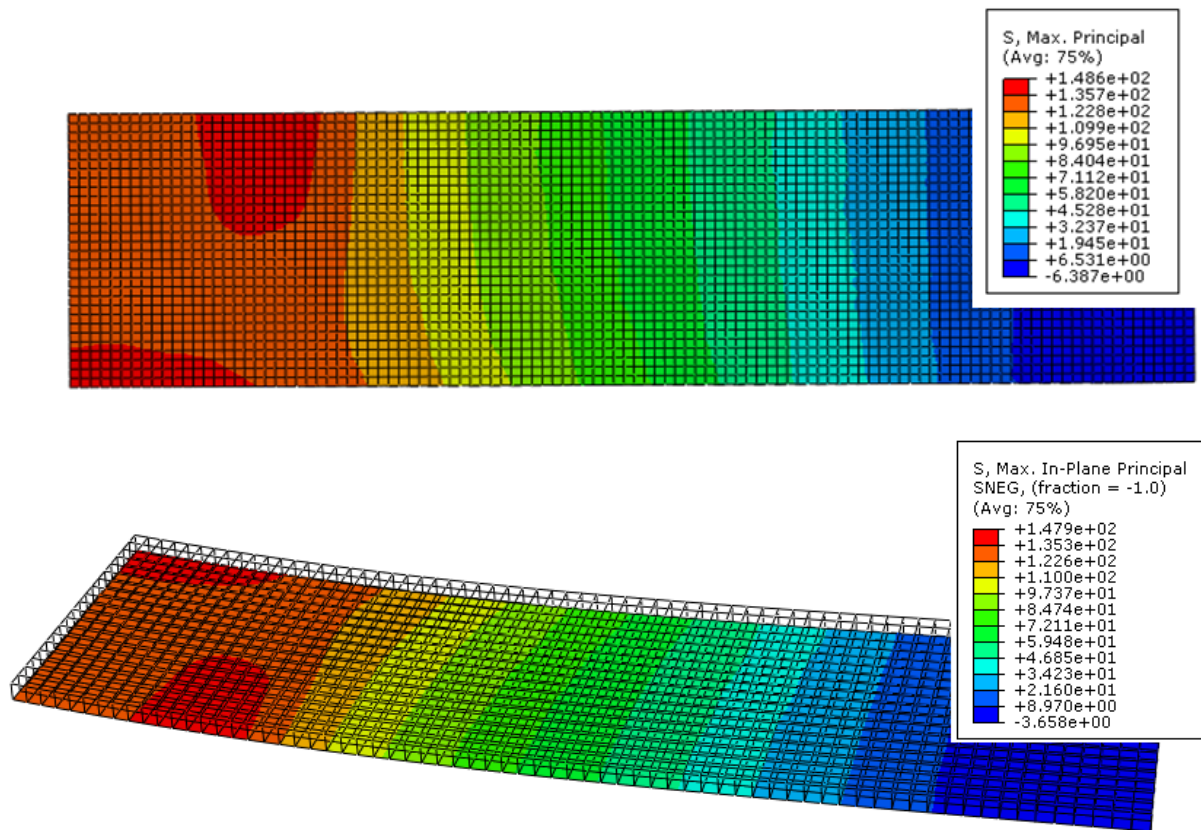
Слика 7.5: Напонска распределба во моделот BG_10

Откако се испитани моделите со чисто стакло, во втората фаза од нумеричкото моделирање анализирани се хибридните модели од стакло и челик. Во текот на формирањето на склопот, дефинирани се хомогени контакти помеѓу различните елементи од хибриодот кои симулираат идеално лепење на површините. Моделирањето на перфорираниот лим и лепилото е изведено со иста геометрија со цел да се моделира ослабување на зајакнувањето во местото на отворите коешто и реално постои во физичките модели од примероците. Дебелината на лепилото повторно е земена како константна по целата површина на спојување.

Од приказот може да забележиме дека поставувањето на моделот е идентично како претходно опишаниот модел при ист вид на оптоварување и гранични услови. Бидејќи идејата на истражувањето е намалување на напоните и нивна прераспределба во стаклениот елемент, во продолжение прикажани се напоните како излезна големина во стаклениот елемент од хибридниот модел (слика 7.6).

Од легендата директно може да се отчита промената во магнитудата на максималните напони кои се наоѓаат во затегачката зона на напрегање (слика 7.6 горе). Во однос на прераспределбата на напоните, деформируваниот модел покажува намалување на областа на максимални напони во затегачката зона што директно се должи на зајакнувањето во оваа зона. Ова важи и за моделот кој е анализиран со 3Д луспи каде гледаме поголемо намалување на магнитудата на напоните, а идентична напонска распределба во затегачката зона на елементот од стакло.

Вертикалната деформација која се јавува кај моделот е намалена поради зголемената крутост на хибридниот модел во однос на елементот од чисто стакло.



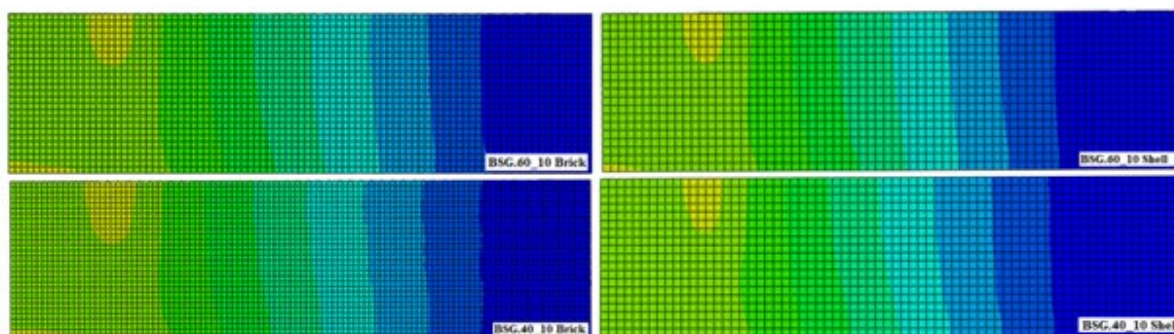
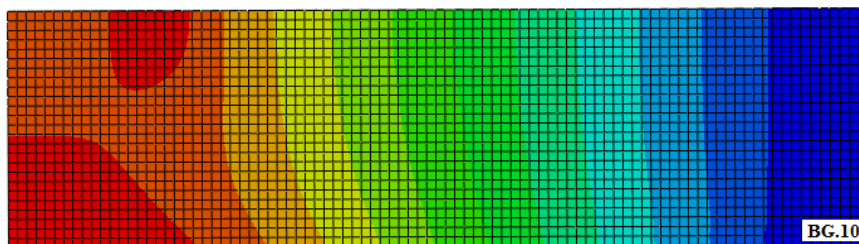
Слика 7.6: Напонска состојба на хибриден модел BSG.40_10

(конечен елемент C3D8I – горе и конечен елемент SC8R доле)

Влијанието врз распределбата на напоните е една од основните цели за воведувањето на перфорираниот лим како зајакнување. Со помош на нумеричкото моделирање може да се добие увид во распределбата на напоните и да се анализира нивната промена. За таа цел на наредната слика (слика 7.7) дадени се споредбени прикази на распределбата на напоните во затегнувачката зона за моделите со дебелина 10mm за двата типа на конечни елементи кои се користени во текот на анализата.

Она што може да се забележи од приказите е дека постои промена во распределбата на напоните во стаклото која е порамномерната за моделите каде е воведено зајакнувањето. Концентрацијата на напонот на самиот раб која е забележлива кај елементот од стакло (BG.8), која всушност е карактеристична појава за овие елементи во текот на испитувањето при притискање во четири точки, се појавува како поле на зголемени напони кај хибридните елементи меѓутоа со многу помала магнитуда. Од

приказот дополнително може да се забележи дека димензиите на формите на перфорација не влијаат на распределбата на напоните, туку само на нивната магнитуда.



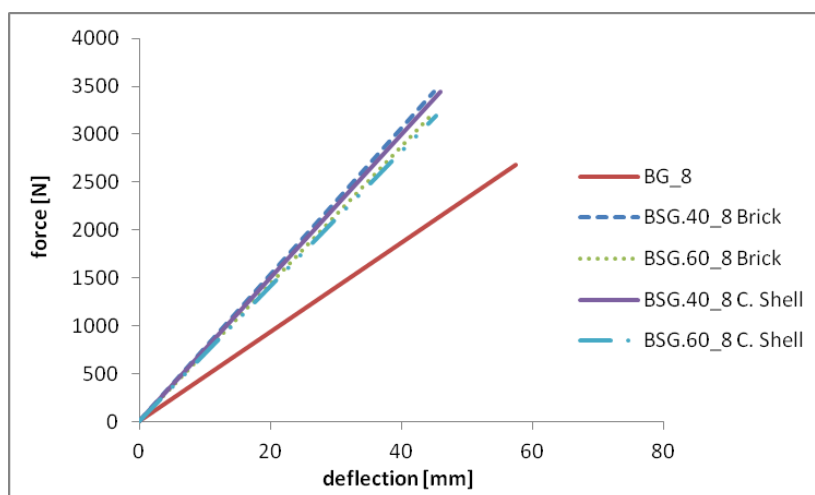
Слика 7.7: Напонска распределба кај модели со дебелина на стакло 10mm

BSG.60_10 Brick (лево горе); BSG.60_10 Shell (десно горе);

BSG.40_10 Brick (лево доле); BSG.40_10 Shell (десно доле)

Во продолжение, графички се дадени споредбените дијаграми добиени во нумеричката анализа кои го прикажуваат капацитетот на зајакнување кое се добива со хибридната структура. Бидејќи структурата на хибридните елементи претставува еден вид асиметрична ламинирана структура, според теоријата за ламинирани структури, крутоста на целиот композит зависи од крутоста на поединечните елементи во составот на структурата но и од врската помеѓу овие елементи.

Во контекст на ова, на наредниот дијаграм (слика 7.8) дадени се споредбени криви за моделите со дебелина на стаклен елемент 8mm.



Слика 7.8: Споредбени криви сила-деформација за модели со стаклен елемент 8 mm

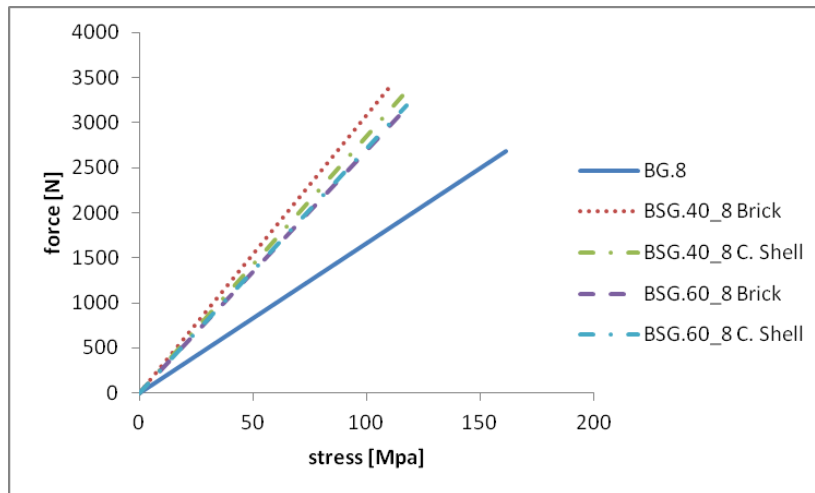
Моделирањето на хибридните елементи е изведено со различни видови на конечни елементи со цел да се анализира влијанието на типот на конечен елемент врз напонско-деформационата состојба која се добива.

Од дијаграмот кој е прикажан на сликата, може да забележиме дека капацитетот на зајакнување на двата вида на перфорации е приближно ист. Ова го гледаме преку малата разлика во магнитудата на силата која можат елементите да ја издржат мерена при иста вертикална деформација. Конечните елементи кои се употребени и во двете анализи даваат исти резултати што укажува на ефикасноста на двата видови на елементи во моделирањето на проблемот. Разликата која се добива при пресметката на моделот е времетраењето на анализата која е многу пократко при употреба на 3D луспи за мрежирање на моделот, што директно се должи на формулацијата на самиот конечен елемент.

Она што може да се забележи во однос на деформацијата на елементот, е дека со воведување на зајакнувањето се намалува вкупната деформација на елементот, а притоа хибридните елементи покажуваат зголемена јакост во однос на силата која може да ја издржат.

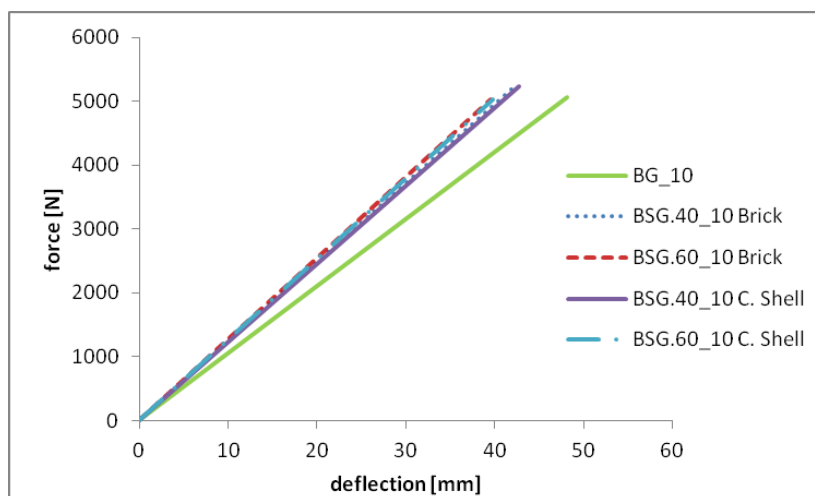
Од друга страна, зајакнувањето делува и на напонската состојба на стаклениот елемент (слика 7.9). Нумеричките модели покажуваат забележително намалување на напоните кои се јавуваат во зоната на затегачки напони. Од дијаграмот се забележува мала разлика во влијанието од големината на формите на перфорација, односно двата типа на перфорација нудат сличен капацитет на зајакнување. Процентуалното намалување на напоните со воведување на перфориран зајакнувачки елемент со 40mm дијаметар на формите изнесува 44% додека пак перфорацијата со поголеми форми 38%. Во однос на

моделирањето со различните конечни елементи, се добива иста напонската состојба и во двата случаи на анализа.



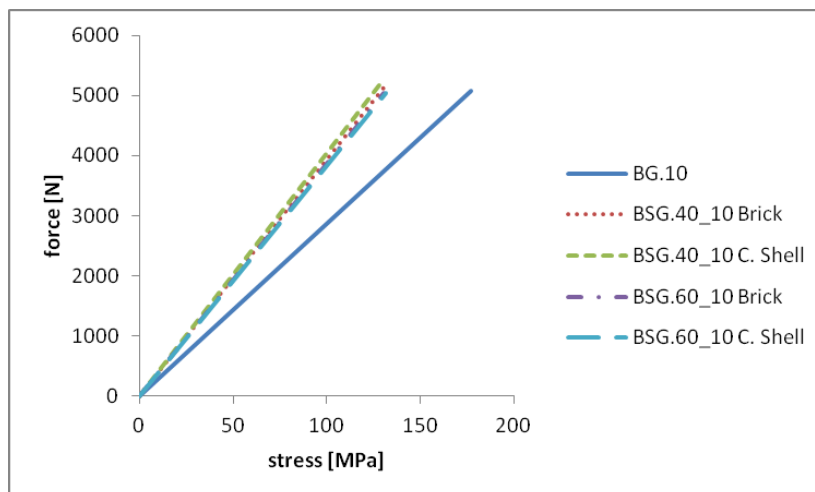
Слика 7.9: Споредбени криви сила-напон за модели со стаклен елемент 8 mm

Влијанието на зајакнувањето кај хибридните модели кои вклучуваат стаклен елемент со дебелина 10 mm е дадено на наредната слика 7.10. На дијаграмот прикажани се споредбените криви за карактеристиката сила – деформација. Зајакнувањето кое се користи ги има истите димензии како и кај претходно претставените хибридни модели. Имајќи предвид дека стаклениот елемент има поголема дебелина во однос на претходните, капацитетот на зајакнување е помал во однос на моделите кои содржат стаклен елемент со помала дебелина. Сепак може да се забележи намалување на вертикалната деформација добиена при иста вредност на аплицирана сила, што го потврдува зајакнувањето на стаклениот елемент.



Слика 7.10: Споредбени криви сила-деформација за модели со стаклен елемент 10mm

Промената во напонската состојба кај елементот од чисто стакло со дебелина 10 mm може да ја видиме графички на дијаграмот од слика 7.11 каде е дадена промената на напонот при соодветна сила на оптоварување.



Слика 7.11: Споредбени криви сила-напон за модели со стаклен елемент 10mm

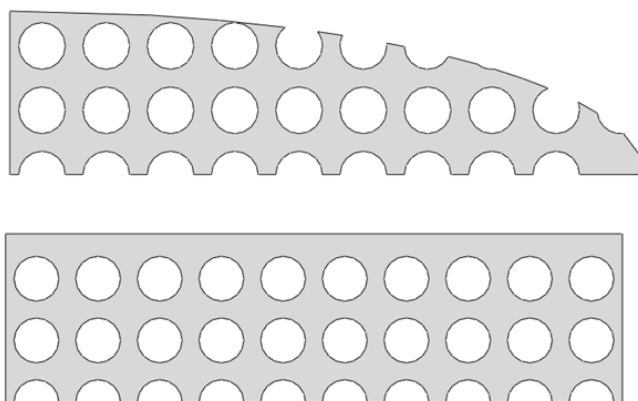
Влијанието на перфорираното зајакнување има слична тенденција како и хибридните елементи со помала дебелина на стаклото, меѓутоа капацитетот на зајакнување е помал, што директно се должи на дебелината на елементот од стакло, односно зголемената целокупна крутост на композитот. Капацитетот на зајакнување на перфорацијата со поголема ефективна површина на метал изнесува 28%, додека зајакнувањето со поголеми форми на перфорација изнесува 25%.

Што се однесува пак до примената на конечните елементи, при одредување на напонската состојба не се јавуваат разлики кај хибридните модели при иста димензија на перфорацијата.

Добиените резултати се однесуваат на анализа на нумерички модели кои се дефинирани во еластично подрачје поради механичките карактеристики на стаклото кои не опфаќаат пластично подрачје на деформација. Ова е една од претпоставките кои го поедноставуваат нумеричкиот модел меѓутоа за условите кои се симулираат во ова истражување е оправдана со оглед на тоа што со зајакнувањето се цели да се влијае на напонската состојба и однесување на елементот од стакло.

Од друга страна пак, големите деформации кои се јавуваат при испитувањето предизвикуваат сили на смолкнување на краевите од моделот, кои се карактеристични за ламинирана структура на композит. Со цел да се покаже влијанието на овој ефект врз

крутоста на комозитот во целост, направено е моделирање на лепилото со претпоставена намалена ефективна површина на носење. На слика 7.12 прикажана е разликата во геометријата на лепилото како елемент во нумеричкото моделирање. За да се симулира физичкото ослабување по краевите на ламинираните слоеви, геометријата на намалената ефективна површина е елипса. Намалувањето е направено за близу 30% од површината на перфорираниот лим.



Слика 7.12: Ефективна површина на слој од конструктивно лепило

(горе – намалена; долу – во целост)

Ова влијание е анализирано на хибридните модели кои во себе содржат стаклен елемент со дебелина 10 mm. Добиените резултати од оваа анализа се дадени во продолжение каде е опфатена споредбена анализа на резултатите од нумеричкото и експериментално испитување.

Направената нумеричка анализа ја потврдува хипотезата на ова истражување, дека ламинираната структура на хибридните елементи влијае врз јакосните и деформационите карактеристики на стаклениот елемент. Со цел да се направи верифицирање на резултатите добиени од оваа анализа направени се споредбени анализи со резултатите добиени при експерименталните испитувања на физичките модели. Крајната цел е добивање на нумерички модел кој понатаму може да се употребува за испитување на различни концепти на хибридни модели, со различни дебелини на стаклениот елемент и уште поважно со различни видови на перфорации и гранични услови на потпирање. На овој начин се добива вредна и ефтина алатка за анализа на хибридни модели со промена на различни параметри пред истите да треба да бидат испитани експериментално, со што се намалува вредноста на процесот од економски аспект и времетраење.

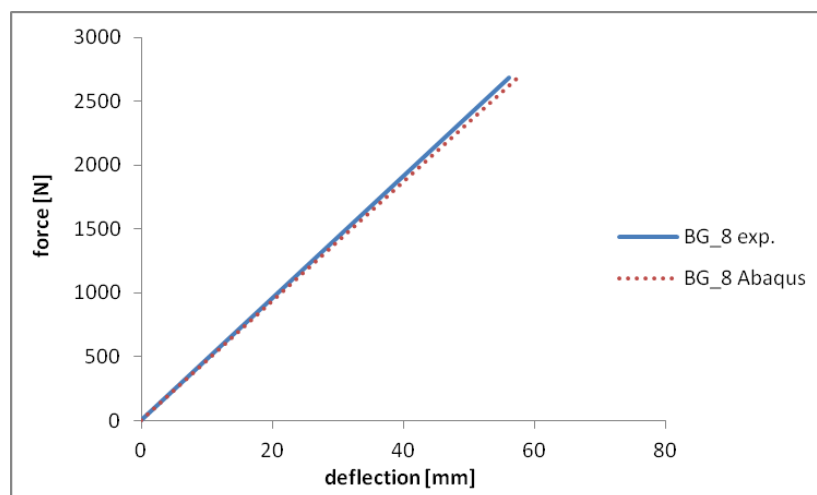
7.3. СПОРЕДБЕНА АНАЛИЗА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО

По направената нумеричка анализа на моделите, направена е верификација на добиените модели преку споредбена анализа со резултатите добиени од експерименталните испитувања. Резултатите го покажуваат капацитетот на зајакнување на стаклениот елемент со додавање на челичен елемент во зоната на затегачки напони каде стаклото е најслабо. Нумеричкото моделирање и анализа се важен елемент во испитувањата на новите концепти и добивање на резултати блиски до експерименталните претставува доказ за веродостојноста на пресметките добиени на овој начин.

Во продолжение дадени се резултатните криви од испитувањата на елементите од стакло, преку споредбени дијаграми на карактеристиката сила - деформација.

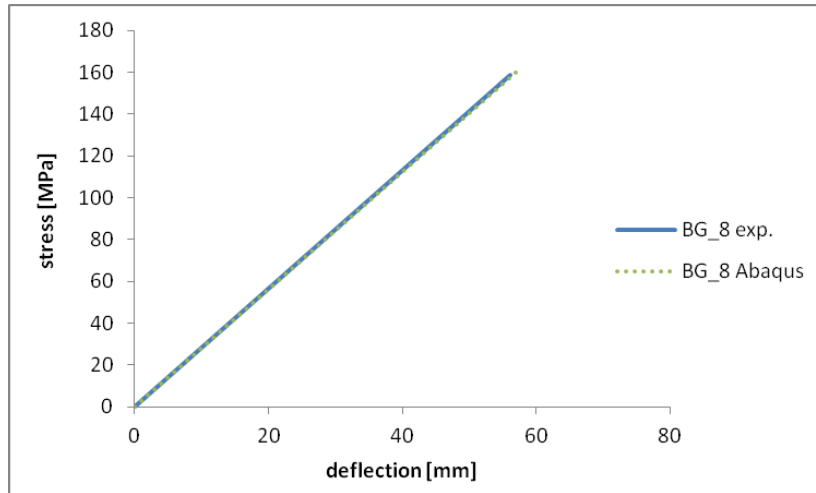
Во првиот дијаграм прикажан на слика 7.13 дадена е кривата добиена за зависноста на силата и отклонот измерени при експерименталното испитување, и кривата добиена со нумеричкото моделирање на овој модел кој се однесува на стаклениот елемент со дебелина 8 mm.

Од дијаграмот гледаме поклопување на кривите со што се потврдува точноста на избраните конечни елементи и нивниот број во мрежата добиени при анализа на конвергенција на почетокот од самото моделирање.



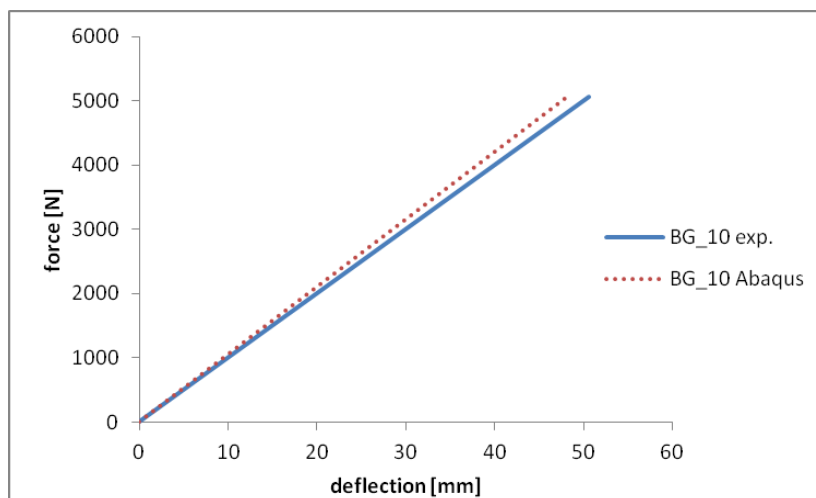
Слика 7.13: Дијаграм сила – деформација за моделите BG_8

На наредната слика 7.14 даден е споредбениот дијаграм за напонската состојба на стаклениот модел добиени при иста максимална сила на кршење на елементот. Од дијаграмот повторно гледаме поклопување на кривите во однос на крутоста на моделот.



Слика 7.14: Дијаграм напон – деформација за моделите BG_8

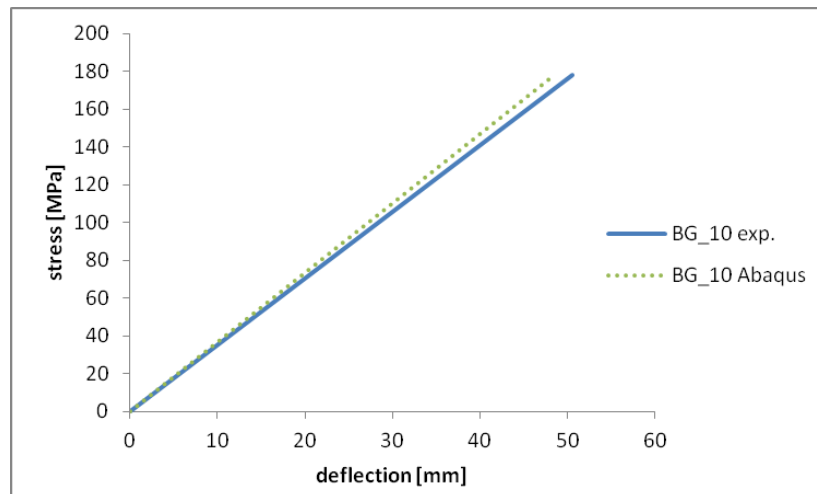
Преку истиот начин на моделирање и анализа, добиена е напонската состојба и деформациите за стаклените модели со дебелина 10 mm. Споредбените дијаграми се дадени во продолжение на слика 7.15.



Слика 7.15 Дијаграм сила – деформација за моделите BG_10

Од споредбениот дијаграм за зависноста на силата и поместувањето се гледа прилично поклопување на резултатите со мала дивергенција која настанува при максималната сила. Причина за оваа разлика се можните грешки и недостатоци во хомогеноста на реално испитуваните стаклени елементи кои не се земени предвид во моделирањето.

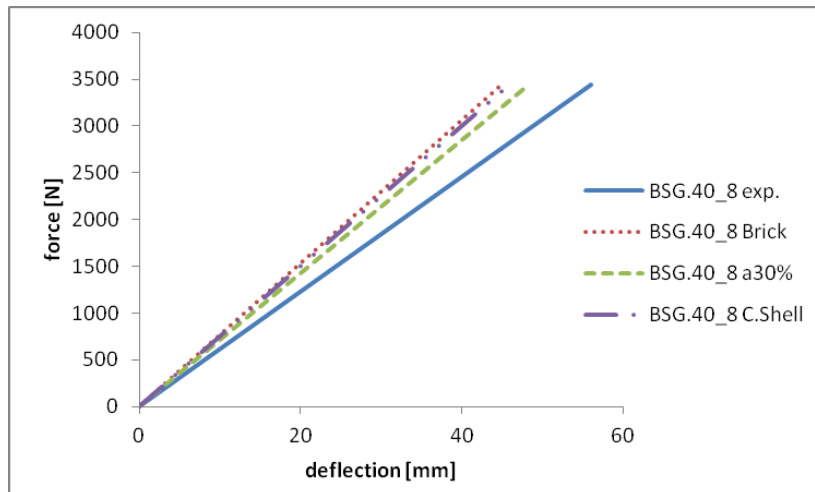
Слична големина во разликите во резултатите е добиена и во напонската состојба на моделот при иста максимална сила на оптоварување (слика 7.16).



Слика 7.16: Дијаграм напон – деформација за моделите BG_10

Во продолжение се дадени резултатите од анализите направени на хибридните елементи. На слика 7.17 даден е дијаграмот за добиените отклони во средината на хибридниот елемент со зголемување на оптоварувањето до моментот на кршење на стаклениот елемент. Она што може да го забележиме на дијаграмот е промената во крутоста на композитот добиен со нумеричко моделирање споредено со крутоста на физичкиот примерок. Зголементата крутост на нумеричкиот модел се должи во голема мера на начинот на моделирање кој во себе не содржи голем дел од ефектите кои се јавуваат кај физичките модели. Промената на конечните елементи во 3Д луспи, даваат идентични резултати за крутоста на хибридниот елемент во споредба со моделите каде се применети просторни елементи. Разликите во добиената крутост во голема мера се должи на дефинирањето на материјалите од кои е составен композитот кои при нумеричкото моделирање се дефинирани како идеално еластични. Можните откажувања на врската помеѓу елементите што е резултат на различните механички карактеристики на материјалите не се земени предвид при нумеричкото моделирање односно, спојувањето на хибридни модели е дефинирано како идеална врска. Дополнително, бидејќи лепењето

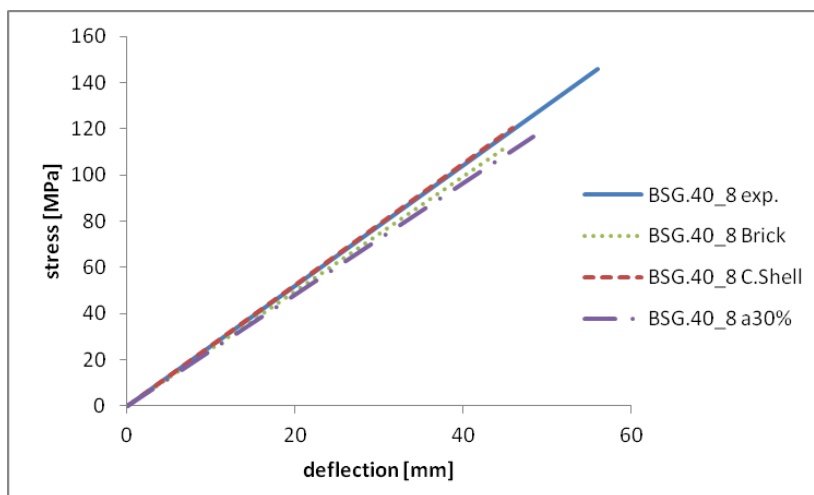
на физичките модели е изведено рачно и не е употребена автоматизирана постапка не постои гаранција дека лепилото има еднаква дебелина по целата површина на лепење, што заедно со грепките кои се јавуваат при ваквата технологија на спојување, влијае на целокупната крутост на композитот.



Слика 7.17: Дијаграм сила – деформација за моделите BSG.40_8

Од друга страна пак, како што беше споменато и кај нумеричкото моделирање, големите деформации кои се јавуваат при испитувањето предизвикуваат сили на смолкнување на краевите од моделот, кои се карактеристични за ламинирана структура на композит. На дијаграмот дадена е и кривата за влијанието на геометриското намалување на ефективната површина на носење на слојот до лепилото. Може да се забележи промена во крутоста на целокупниот хибриден модел при намалена површина на носење на врската изведена со лепило.

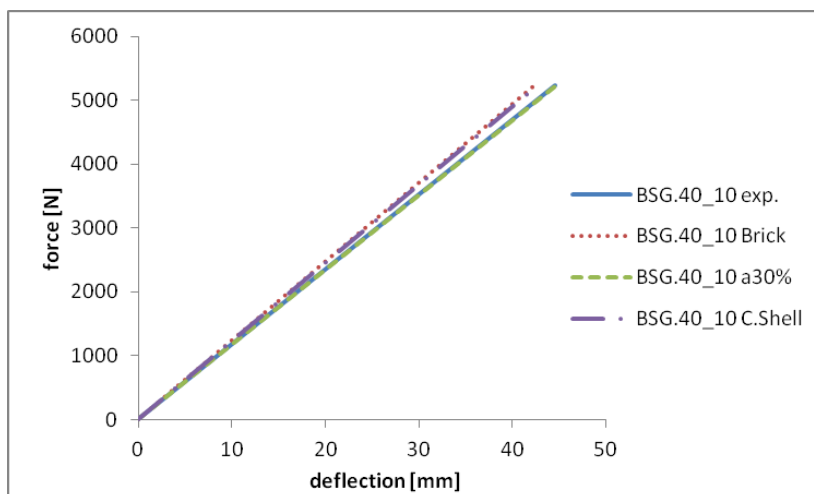
Во продолжение се дадени дијаграмите за напонската состојба кај хибридниот модел со перфорација од 40 mm и дебелина на стаклениот елемент од 8 mm (слика 7.18).



Слика 7.18: Дијаграм напон – деформација за моделите BSG.40_8

Од прикажаното на дијаграмите може да забележиме поклопување на кривите кои ја дефинираат напонско-деформационата состојба на разгледуваните модели со физичките модели испитани по експериментален пат. Со внесување на промените во ефективната површина на лепилото со кое директно влијаеме на крутоста односно деформабилноста на композитот во целост, може да се забележи мало отклонување при постигнувањето на максималната вредност на главните напони во моделот.

Истиот пристап на моделирање беше употребен и кај моделирањето на хибридниот модел со иста димензија на перфорацијата на зајакнувачкиот елемент, а со зголемена дебелина на елементот од стакло (слика 7.19).

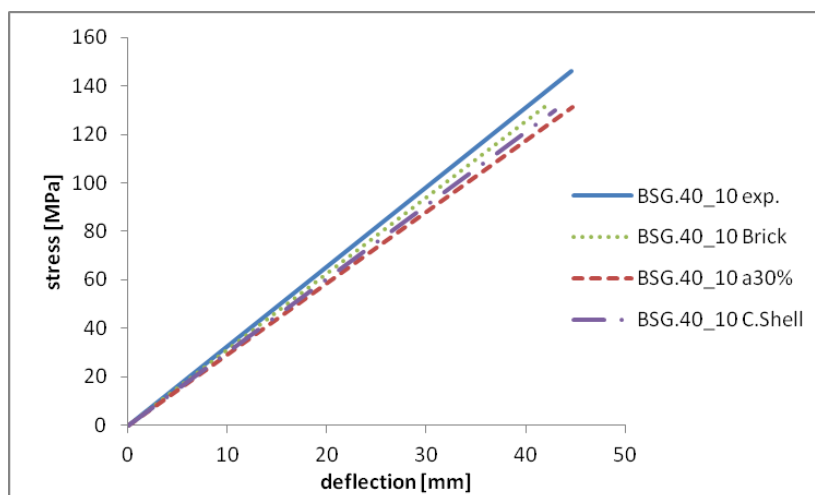


Слика 7.19 Дијаграм сила – деформација за моделите BSG.40_10

Дијаграмите покажуваат поклопување на карактеристичните криви што укажува постоење на помалку грешки при формирањето на физичките модели од композитот. Она што дополнително може да се забележи од дијаграмите е целосно поклопување на кривата која се добива со геометриско намалување на лепилото во хибридниот елемент, што може да значи и појава на реално ослабување на врската при експерименталното испитување точно на очекуваните места на рабовите од ламинираната структура. Генерално земено, овие модели имаат поголема целокупна крутост која се должи на зголемената дебелина на елементот од стакло на која дополнително влијае зајакнувањето со својата ефективна површина на носење. Ова предвидува намалување на вертикалната деформација во средината на елементот, а поголема максимална сила на оптоварување.

На ваков хибриден пресек во непроменети гранични услови и дебелини на останатите слоеви, вкупниот отклон кој се јавува кај моделите е помал, па помало е и влијанието врз носивоста на лепилото во областа на смолкнувачки сили. Затоа истото процентуално намалување на ефективната површина на лепилото јавува поголемо влијание врз точноста на резултатите кај овие хибридни модели во однос на претходно анализираниите.

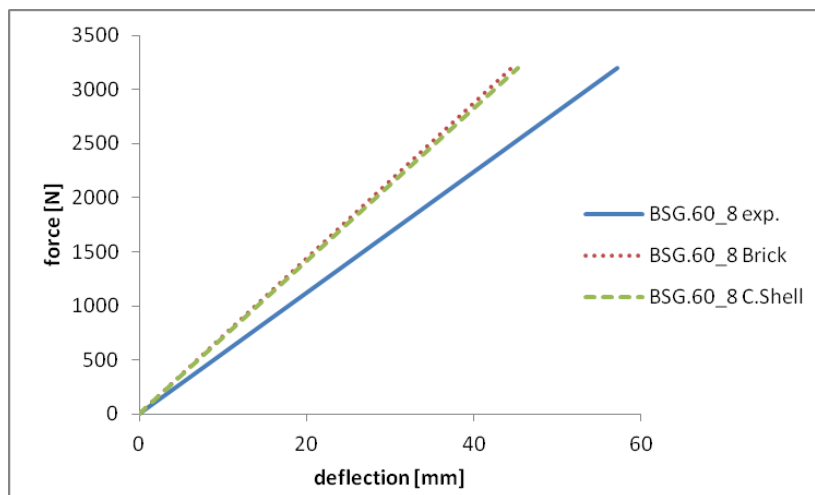
На наредниот дијаграм прикажан на слика 7.20, дадени се споредбените криви на напонската состојба на моделите. Она што може да се забележи е прилично поклопување на напонско-деформационата состојба на физичките модели и моделите од нумерчката анализа.



Слика 7.20: Дијаграм напон – деформација за моделите BSG.40_10

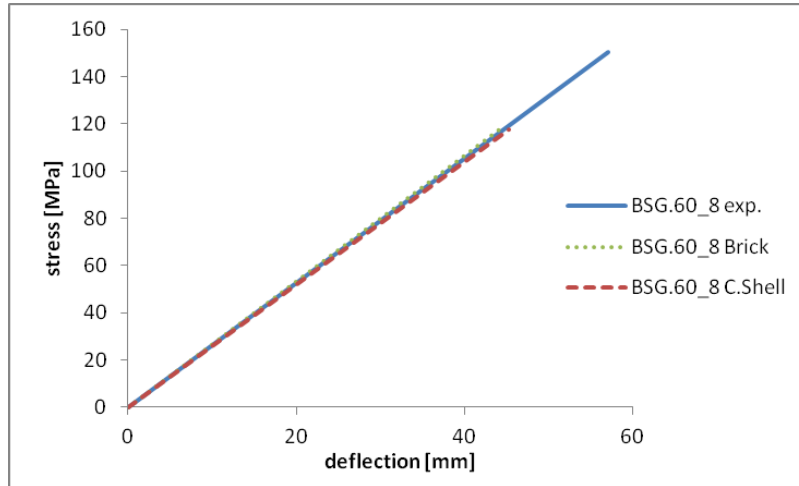
Во продолжение прикажани се споредбените дијаграми од хибридните модели со зголемена перфорација на зајакнувачкиот слој во два модели со различна дебелина на елементот од стакло. Бидејќи е утврдено влијанието на ефективната површина на лепилото, во наредните анализи не се вклучени промените на геометријата на лепилото и дадени се споредби со идеално еластичниот модел на хибридните елементи.

На слика 7.21 дадени се споредбени криви за моделите BSG.60_8 за карактеристиката сила-деформација. Од дијаграмот забележуваме зголемена крутост кај нумеричкиот модел при моделирање со различни конечни елементи. Она што може да се забележи е дека при иста максимална сила физичкиот модел појавува поголеми отклони во средината на елементот што укажува на постоење на можни грешки во врската помеѓу елементите и делумно откажување на лепилото.



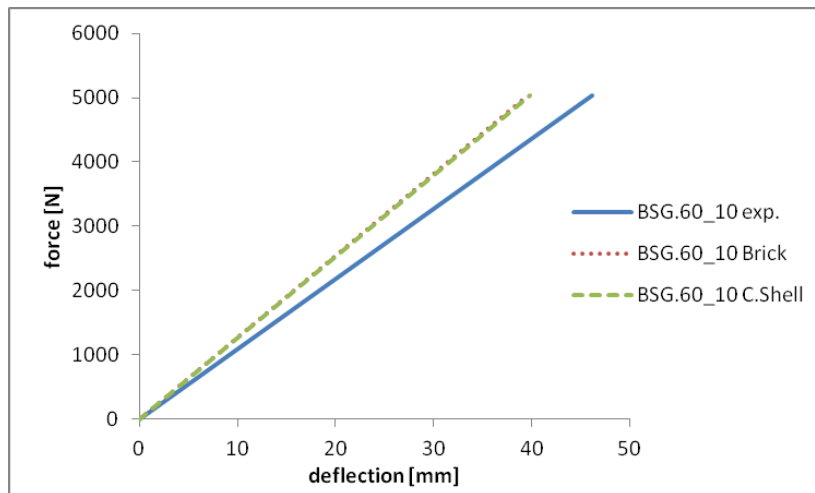
Слика 7.21:: Дијаграм сила – деформација за моделите BSG.60_8

Напонската состојба добиена нумерички за моделите BSG.60_8 е дадена на следниот дијаграм (слика 7.22) од каде се гледа поклопување на тенденцијата на карактеристичната крива со разлика во максималната вредност на постигнатиот напон што повторно се должи на идеалната врска кај нумеричкиот модел и зголемената крутост.

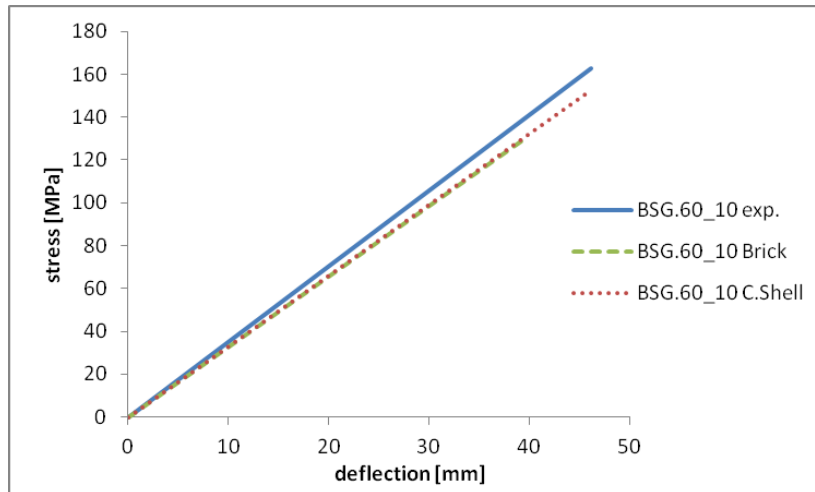


Слика 7.22: Дијаграм напон – деформација за моделите BSG.60_8

Во последната фаза од нумеричката анализа испитувани се хибридните модели BSG.60_10. Резултатите добиени од овие модели за зависноста на силата и угибот и напонската состојба на стаклениот елемент, се дадени во продолжение, на слика 7.23 и слика 7.24 соодветно. Од дијаграмите се забележува слична тенденција на кривите како и кај моделите со дебелина на стакло 8mm со помала разлики во крутоста на моделите поради реално поголемата крутост на физичкиот модел со елемент од стакло од 10mm.



Слика 7.23: Дијаграм сила – деформација за моделите BSG.60_10



Слика 7.24: Дијаграм напон – деформација за моделите BSG.60_10

Од добиените резултати, може да заклучиме дека физичките појави кои се однесуваат на ламинираните структури и кои влијаат на крутоста односно на носивоста на хибридниот елемент треба соодветно да се дефинираат во нумеричките модели. Овие влијанија може да се моделираат преку промена на геометриската форма на моделираниот слој за врска, метод кој е употребен во истражувањето во склоп на докторската дисертација.

Друг метод кој може да се употреби е воведување на промени во мрежата на конечни елементи на слојот од лепило преку нејзино локално згуснување. Во склоп на овој метод потребно е да се употребат конечни елементи за моделирање на кохезивна врска, а во одредени случаи кога е потребно да се симулира и одделувањето на лепилото од површините на врзување, моделот кој се користи за дефинирање на материјалот на лепилото треба да содржи виско-еластични својства. Сепак употребата на овој метод е ограничена на модели со мали димензии кои ќе овозможат формирање на доволно густа мрежа од конечни елементи.

Анализираните модели од докторската дисертација неможе да бидат анализирани со помош на овој метод поради односот во големината на конечните елементи во различните слоеви од хибридниот во случај на таков вид на моделирање. Во ваков случај конвергенцијата кон решението би била крајно отежната или невозможна.

Начин да се избегнат овие потешкотии во моделирањето и да се зголеми точноста на резултатите е промена на моделот на материјалот употребен за елементите односно вклучување на нелиенарноста на материјалите. Доколку се користи виско-еластичен модел за моделирање на лепилото, во моментот на надминување на еластичните

деформации, во текот на анализата, се активираат вискозните карактеристики на лепилото кои во одреден процент би го симулирале намалувањето на крутоста на композитот при поголеми вертикални деформации.

Сепак, според добиените резултати од извршените анализи, еластичниот модел употребен во истражувањето од докторската дисертација ги задоволува дефинираните цели земајќи ги предвид условите на испитување, собна температура на испитување и краткотрајно дејство на оптоварувањето.

8. ЗАКЛУЧОЦИ

Во оваа глава се дадени заклучните согледувања добиени од истражувањето спроведено во дисертацијата и препораките за идни истражувања. Новопредложените концепти на хибридни елементи може да придонесат во интегритетот и сигурноста на носечката конструкција. Овие концепти на ламинирани структури ја содржат во себе

логиката на веќе докажаните елементи од ламинирано стакло кои активно се користат во практиката, преку задржување на безбедноста која ја нудат ваквите елементи, а делумно ги елиминираат нивните недостатоци пред сè во однос на вкупната маса на елементот. Во однос на механичките карактеристики, кај хибридните елементи се потврдува најважната карактеристика на преостанат капацитет на носивост по појава на првиот лом со што се потврдува зајакнувачката функција на самата структура на елементот. Како една од придовките на истражувањето е добивање на брза и ефикасна алатка за нумеричка анализа на концептите на хибридните модели како и можност за лесна понатамошна параметричка анализа на истите при промена на различни влијателни параметри.

На крајот од главата дадени се препораки за понатамошни испитувања на темата кои пред сè се однесуваат на подобрувања на нумеричкиот модел, воведување на дополнителни параметри релевантни за формирањето на концептот на хибридните модели, развивање на технологија на спојување на елементите во композитот итн.

8.1. ЗАКЛУЧОЦИ ВРЗ ОСНОВА НА СПРОВЕДЕНИТЕ ИСТРАЖУВАЊА

Она што треба да произлезе од спроведените истражувања во оваа дисертација се нови концепти на хибридни модели со ламинарна плочеста структура составени до стакло и перфориран челичен лим како зајакнување. Преку направените физички модели и експериментални анализи направен е чекор кон дизајнирање на нов конструктивен елемент чијашто примена е инженерски меѓутоа и архитектонски оправдана.

Стаклото како конструктивен материјал наоѓа сè поширока примена во конструктивното инженерство и неговата улога станува сè поодговорна. Како конструктивен елемент треба да ги издржи и да ги пренесе оптоварувањата кои делуваат на конструкцијата од нејзиниот покрив кон основата, како и да ја стабилизира и зајакне

истата. Со ваквата употреба на стаклото, се добиваат конструкции кои се целосно транспарентни и кои во позадина може но и немора да содржат челична носечка конструкција

Со воведувањето на постапките на термичко зајакнување се зголемува значително носивоста на стаклото преку создавање на напони на притисок во површината на елементот кој се зајакнува. Оваа специфична напонска состојба која ја има стаклото по зајакнувањето го менува и начинот на доживување на лом на елементите од калено стакло.

Иако со технологиите на термичко зајакнување на стаклото се постигнува зголемување на носивоста од јакосен аспект, сепак останува проблемот на деформациите кои може еден стаклен елемент да ги издржи без да настане лом. Во насока на ова, по последните две децении интензивно се користи ламинирано стакло кое се добива со поврзување на два или повеќе стаклени панели со тенки полимерни филмови (PVB – поливинил бутирал, EVA – поливинил ацетат, Sentry Glass), а со кое се обезбедува одреден капацитет на преостаната носивост, обезбедена од полимерниот материјал, која спречува инстантен колапс на елементот при појава на лом.

Површинските грешки и процесите за зајакнување на стаклото се директно поврзани со производствената јакост на елементот од стакло. Друг процес кој влијае врз неговата теоретска јакост и потенцијално го ослабува елементот, е формирањето на отвори за завртки кои се користат кај механичките врска изведени на овој начин. Поради ова сè поактуелни стануваат врските изведени со лепење кои користат конструктивно лепило со цел избегнување на дополнителни механички обработки и појава на концентрација на напони кај елементите од стакло при нивно меѓусебно поврзување.

Сè поголемата употреба на стаклото во конструкциите ја наметнува потребата од развој на нови решенија за конструктивните елементи. Хибридниот конструктивен елемент изработен од стаклен панел и челична плоча со отвори претставува едно ново иновативно решение кое од една страна обезбедува транспарентност и можност за проектирање на засенувањето односно дисперзијата на светлина, а од друга страна овозможува зголемени механички и безбедносни карактеристики на конструктивниот елемент.

Важна предност на хибридните модели е влијанието врз главната негативност на стаклото како конструктивен материјал, неговата кртост, преку обезбедување на капацитет на преостаната носивост и по појава на лом на елементот од стакло, која се

добива како резултат на структурата на хибридните модели. Ова претставува начин да се обезбеди дуктилност на композитот со што се овозможува негова примена како конструктивен елемент.

Определувањето на механичкото однесување и карактеристики на формираните хибридни елементи се изведува со експериментално испитување и нумеричка анализа со методот на конечни елементи. При испитувањето на елементите од чисто стакло се добива поклопување на резултатите од нумеричката анализа и експерименталните испитувања со што се потврдува ефикасноста и веродостојноста на нумеричкиот модел.

Од испитувањата направени на хибридните модели може да забележиме промена во крутоста на композитот добиен со нумеричко моделирање споредено со крутоста на физичкиот примерок. Зголементата крутост на нумеричкиот модел се должи во голема мера на начинот на моделирање кој во себе не содржи голем дел од ефектите кои се јавуваат кај физичките модели.

Нумеричкото моделирање со конечни елементи претставува метод кој може во голема мера да го симулира физичкото однесување на предложените хибридни модели. Бидејќи се работи за плочести елементи кои се моделираат во состојба на чисто свиткување, изборот на конечни елементи во истражувањето се сведува на просторни елементи и посебен вид на 3Д лушпи.

Од нумеричкото моделирање и анализата на моделите се покажува дека изборот на конечните елементи влијае на пресметката на напонско-деформационата состојба, пред сè на магнитудата на големините. Со употреба на посебен вид на лушпи како конечни елементи се добиваат модели коишто постигнуваат конвергенција кон решението за пократко време во однос на просторните елементи употребени во истражувањето.

Промена на напонската распределба во елементот од стакло, како една од главните цели, се постигнува со помош на воведеното зајакнување, и истото е прикажано при нумеричката анализа на моделите каде се воочуваат намалените напонски концентрации и порамномерно распоредување на напоните во критичната затегачка зона на елементот од стакло.

Физичките појави кои се однесуваат на ламинираните структури и кои влијаат на крутоста односно на носивоста на хибридниот елемент треба соодветно да се дефинираат во нумеричките модели. Големите деформации кои се јавуваат при испитувањето предизвикуваат сили на смолкнување на краевите од моделот, кои се карактеристични за ламинирана структура на композит. Овој факт е потврден со геометриско намалување на

ефективната површина на слојот од лепилото за 30% со што според резултатите добиени од нумеричката анализа се потврдува претпоставката и се намалува крутоста на нумеричкиот модел приближувајќи се кон експериментално добиената. Ова процентуално намалување на ефективната површина покажува поголеми влијанија кај елементите со поголема дебелина на стаклениот елемент.

Помалите разлики во крутоста на нумеричкиот модел во однос на физичкиот модел на хибриден елемент каде е присутен стаклен елемент со дебелина 10 mm се должи на реално поголемата крутост на овие хибридните пробни парчиња, за разлика од моделите со дебелина на стаклениот елемент од 8 mm кои и физички доживуваат поголеми вертикални деформации во текот на експерименталното испитување.

Според добиените резултати од извршените анализи, еластичниот модел употребен во истражувањето од докторската дисертација ги задоволува дефинираните цели земајќи ги предвид условите на испитување, температурата на испитување и краткотрајно дејство на оптоварувањето.

Примената на предложените хибридни модели се оправдува од повеќе аспекти, пред сè од аспект на механичкото однесување и јакосните карактеристики кои ги нуди композитот, меѓутоа и од естетски аспект поради флексибилноста на дизајнот. Промените кои може да се направат во изгледот на перфорираниот зајакнувачки елемент означуваат можност за добивање на секогаш уникатен концепт кој во исто време ќе може да ги задоволи и визуелните и функционалните потреби на корисникот.

8.2. ПРЕПОРАКИ ЗА ПОНАТАМОШНИ ИСПИТУВАЊА

Со оглед на актуелноста на темата, се отвараат многу можности за понатамошни истражувања во областа на конструктивно стакло. Она што е прикажано преку истражувањето во оваа дисертација е капацитетот на стаклото како материјал да учествува во обезбедување на интеграцијата на еден конструктивен елемент кој може да биде одговорен член од носечката конструкција. Зајакнувањето со цел подобрување на неговите механички карактеристики е само чекор понатаму во неговата примена. Користење на перфориран зајакнувачки елемент овозможува во исто време задржување на неговата главна карактеристика на транспарентност, па во таа насока, истражувања се

потребни за воведување на капацитет на транспарентност како карактеристика на хибридните елементи.

Параметарот на осветлување односно засенување што може да се контролира со помош на специфичната перфорација на елементите е фактор кој може да се вклучи во параметричката моделирање на формата на перфорација.

Од друга страна, бидејќи се работи за ламинирана структура на хибридниот елемент, од посебно значење е детална анализа на врската помеѓу поединечните елементи во композитот. Обезбедување на соодветна врска го зголемува значи и посигурно однесување на елементот како композит односно зголемување на капацитетот на зајакнување. Испитувања на различни видови на лепила и воедно дефинирање на соодветна технологија на лепење на елементите може директно да влијае на концептот на хибридните елементи во насока на подобрување на нивното однесување.

Истражувањата изведени во склоп на дисертацијата го земаат предвид само статичкото краткотрајно оптоварување од надворешна сила која дејствува нормално на рамнината на елементот. Воведување на оптоварување во рамнината на елементот односно испитување на извивање е од важно конструктивно значење за еден носечки елемент во конструкцијата. Надворешните оптоварувања понатаму може да се прошират на ударни, динамички итн.

Од посебно значење при користење на врска со лепење е и нејзиното функционирање при различни експлоатациони услови. Температурата има посебно влијание врз полимерните материјали и нивното однесување, па одредување на однесувањето на композитот при зголемени или намалени температури е од голема важност кај материјали кои подлежат на ползење и стареење како што се конструктивните лепила. Од овие нивни карактеристики директно зависи векот на експлоатација на целокупниот композит.

При ставање во употреба на нов концепт на конструктивен елемент потребно е да се дефинираат врските помеѓу елементите во конструкцијата, што претставува посебен предизвик при употребата на елементите од стакло во конструкциите пред сè од аспект на избегнување на концентрации на напони во стаклениот елемент, а во зависност од примената и улогата на хибридниот елемент во конструкцијата.

Анализата на стаклото со примената на нумеричкото моделирање со конечни елементи, кое е актуелно во анализата на конструктивните елементи, претставува исто така предизвик за инженерите поради специфичните механички карактеристики и

однесување на стаклото. Дополнително, неговото комбинирање со еластично-пластични и виско-еластични материјали го усложнува моделирањето и симулирањето на реалното физичко однесување. Во тој контекст, подобрување на нумеричкиот модел и воведување на дополнителни влијателни параметри се потребни за што пореална анализа и претставување на хибридните модели. Со дефинирање на нумерички модел кој ќе ги опфати специфичните ефекти кои се јавуваат при оптоварувањето на хибридните елементи, овозможува добивање на вредна алатка за брза и ефтина анализа на елементите во различни услови на експлоатација и примена.

Употребата на зајакнувачките материјали не треба да се ограничи на челик, зависно од примената, хибридните елементи може да се формираат од различни достапни инженерски материјали кои ќе бидат компатибилни со карактеристиките на стаклото како конструктивен материјал за да соодветно функционираат како композит.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Alsaed, O. & Jalham, I.S., 2012. Material for Laminated Glass. , 6(2), pp.127–133.
- [2] Baitinger, M. & Feldmann, M., 2010. Design concept for bolted Glass. , (May).
- [3] Bos, F.P., 2009. Influence of Elastic Strain Energy Release on Failure Behaviour of Stainless Steel Reinforced Glass Beams.
- [4] Belis, J. et al., 2004. Glass Structures and Plasticity: Contradiction or Future? *Key Engineering Materials*, 274-276, pp.975–980.
- [5] Belis, J. et al., 2009. Laminating metal-to-glass: preliminary results of case-study. In *proceeding of Glass performance days 2009*. pp. 191–193.
- [6] Belis, J., Hulle, A. Van & Out, B., 2011. Broad screening of adhesives for glass-metal bonds. In *Glass Performance days 2011*. pp. 286–289.

- [7] Bennison, S.J. & Davies, P.S., HIGH-PERFORMANCE LAMINATED GLASS FOR STRUCTURALLY EFFICIENT GLAZING. , pp.1–12.
- [8] Bos, F., Veer, F. & Belis, J., 2005. The joints of the All Transparent Pavilion. In *Glass Processing days 2005*. pp. 1–5.
- [9] Bues, M., Bucak, O. & Illguth, M., 2009. Bonded steel glass hybrid beams. In *proceeding of Glass performance days 2009*. pp. 318–320.
- [10] Callaghan, J.O. & Marchewka, M., 2009. Thinking Big with Structural Glass. In *Glass Performance Days 2009*. pp. 59–63.
- [11] Callewaert, D., 2011. *Stiffness of glass/ionomer laminates in structural applications*. Universiteit Gent.
- [12] Carvalho, P., Cruz, P.J.S. & Veer, F., 2011. Perforated steel plate to laminated glass adhesive properties. In *Glass Performance days 2011*. pp. 281–285.
- [13] Chan, S.L., Basic structural design considerations and properties of glass and aluminum structures.
- [14] Contact, G. et al., 2005. Contact Modeling Contact in ABAQUS / Explicit Contact in ABAQUS / Explicit.
- [15] Corning, D., Information about Dow Corning ® Brand Adhesive / Sealants.
- [16] Costa, S. et al., 2006. On the Evaluation of the Mechanical Behaviour of Structural Glass Elements. *Materials Science Forum*, 514-516, pp.799–803.
- [17] Cruz, P.J.S. et al., 2010. Mechanical Modelling of In-Plane Loaded Glass Panes. In *Proceedings of Challenging Glass 2*.
- [18] Dakov, D. & Trifonov, S., 2012. BONDED GLASS-ALUMINUM COMPOSITE MEMBERS. A NEW SOLUTION TO LARGE SPAN BUILDING ENCLOSURES. In *International Jubilee Conference UACG2012: Science & Practice*.
- [19] Diehl, T., Modeling Surface-Bonded Structures with ABAQUS Cohesive Elements : Beam-Type Solutions. , pp.1–27.
- [20] Dutt, D., Mechanical Properties and Fracture Analysis of Glass.
- [21] EU COST C13, 2007. *Glass & Interactive Building Envelopes* M. Crisinel et al., eds., Amsterdam: IOS Press.
- [22] Fam, A. & Rizkalla, S., 2006. Structural performance of laminated and unlaminated tempered glass under monotonic transverse loading. *Construction and Building Materials*, 20(9), pp.761–768.
- [23] Feirabend, S. & Sobek, P.W., 2009. Improved post-breakage behavior of laminated glass due to embedded reinforcement. , pp.726–729.
- [24] Feldmann, M., Kasper, R. & Pilsl, M., 2008. Glass for Structural Applications - the development of the connection design. In *Challenging Glass*.

- [25] Fröling, M., 2011. *Strength design methods for laminated glass*. Lund University.
- [26] Gacnacci, E., Orlando, M. & Spinelli, P., 2009. Experimental campaign and numerical simulation of the behaviour of reinforced glass beams. In *proceeding of Glass performance days 2009*. pp. 484–487.
- [27] Gonzales, S.A., 2009. *Failure analysis of pre-notched composite laminated plates under four-point bending conditions*. Oregon State University.
- [28] Goosen, A., 2007. STRUCTURAL CAPACITY OF FREESTANDING GLASS By. , (February).
- [29] Guide, A.S.D., Architectural, F.O.R. & Systems, G., Structural Performance of Laminated Architectural Glass. , (2458043).
- [30] Haldimann, M., 2006. *Fracture strength of structural glass elements – analytical and numerical modelling, testing and design*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [31] Haldimann, M., Luible, A. & Overend, M., 2007. Structural use of Glass.
- [32] Hartmann, P. et al., 2008. ZERODUR Glass Ceramics - Strength data for the design of structures with high mechanical stresses E. Atad-Ettedgui & D. Lemke, eds. , 7018, p.70180P–70180P–13.
- [33] Helzel, M. & Taylor, I., 2008. *Stainless Steel and Glass*, Brussels: Euro Inox.
- [34] Henriksen, T., 2012. Future Application of Structural Use of Glass. In *Proceedings of Challenging Glass 2*. pp. 2–5.
- [35] Hills, P.D. & Houlsby, G., Aspects of Structural Design with Glass A thesis submitted by for the degree of Doctor of Philosophy Supervised by Balliol College and the Department of Engineering Science ,.
- [36] Hodgkinson, J.M., 7.1 Introduction. , pp.124–141.
- [37] Huurman, M. & Pronk, A., 2009. Theoretical analysis of the 4 point bending test. In *RILEM Symposium Advanced Testing and characterization of bituminous materials*. pp. 749–759.
- [38] Huveners, E., 2008. Numerical Research on Glass Panes Acting as a Shear Wall. In *Challenging Glass*.
- [39] Ivanov, I. V & Sadowski, T., 2011. Mechanical Response of Laminated Glass Subjected to Low-Velocity Impact. , (July), pp.4–6.
- [40] Khorasani, N., 2004. *Design principles for glass used structurally*,
- [41] Krysl, P., 2005. *A Pragmatic Introduction to Finite Element Analysis for Structural Engineers*, San Diego: Pressure Cooker Press.
- [42] Krysl, P. & Belytschko, T., 1999. Analysis of thin plates by the element-free Galerkin method. *Computational Mechanics*.
- [43] Long, S. & Atluri, S., 2002. A Meshless Local Petrov-Galerkin Method for Solving the Bending Problem of a Thin Plate. *CMES*, 3(1), pp.53–63.

- [44] Louter, C. et al., 2011. Durability of SG-laminated reinforced glass beams. In *Glass Performance days 2011*. pp. 275–279.
- [45] Louter, C., 2009. High-strength fibre rods as embedded reinforcement in SentryGlas-laminated glass beams. In *proceeding of Glass performance days 2009*. pp. 285–289.
- [46] Louter, C. et al., 2012. Structural response of SG-laminated reinforced glass beams; experimental investigations on the effects of glass type, reinforcement percentage and beam size. *Elsevier Engineering Structures*, 36, pp.292–301.
- [47] Louter, C., Graaf, A. van de & Rots, J., 2010. Modeling the Structural Response of Reinforced Glass Beams using an SLA Scheme. In *Proceedings of Challenging Glass 2*.
- [48] Louter, C. & Leung, C., 2010. Structural glass beams with embedded glass fibre reinforcement. In *Proceedings of Challenging Glass 2*.
- [49] Louter, C. & Veer, F., 2007. Experimental research on scale 1: 4 models of an 18m reinforced glass beam, part I. In *Glass Performance days 2007*. pp. 87–92.
- [50] Maniatis, D.I., 2005. Structural Analysis for Point Fixing of Glass Under In-plane Loads. , (Figure 3), pp.1–4.
- [51] Maniatis, I., 2006. *Numerical and experimental investigations on the stress distribution of bolted glass connections under in-plane loads*. Technische Universitat Munchen.
- [52] Mocibob, D., 2008. *Glass panel under shear loading-Use of glass envelopes in building stabilization*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [53] Mocibob, D. & Belis, J., 2010. Coupled experimental and numerical investigation of structural glass panels with small slenderness subjected to locally introduced axial compression. *Elsevier Engineering Structures*, 32(3), pp.753–761.
- [54] Mueller, U. & Wagner, W., 2011. High-strength glass bonding – a new era in façade design? In *Glass Performance days 2011*. pp. 658–660.
- [55] Netusil, M. & Eliasova, M., 2010. Experimental and Numerical Analysis of Glued Steel-Glass Joints. In *Challenging Glass 2*. pp. 269–276.
- [56] Netusil, M. & Eliasova, M., 2011. Hybrid steel-glass beams with polymer adhesive. In *Glass Performance days 2011*. pp. 294–298.
- [57] Nhamoinesu, S. & Overend, M., 2012. The Mechanical Performance of Adhesives for a Steel-Glass Composite Façade System. , (June).
- [58] Nishawala, B.Y.V. V, 2011. A STUDY OF LARGE DEFLECTION OF BEAMS AND PLATES.
- [59] Ølgaard, A.B. et al., 2008. Properties of an Adhesive for Structural Glass Applications. In *Challenging Glass*.
- [60] Overend, M. et al., 2013. Glass reinforced glass. , pp.229–231.
- [61] Overend, M., 2010. Recent developments in design methods for glass structures. *The Structural Engineer*, 88(July).

- [62] Panait, A. et al., 2005. Friction-grip Bolted Connections for Structural Glass Elements : Practical Solutions Using an Experimental and Numerical Coupled Approach. , pp.1–5.
- [63] Pankhardt, T.K., 2010. Load bearing glasses.
- [64] Prof. Dr-Ing. Weller, B., 2009. Effects on the Stress Distribution of Bonded Joints with Light-Curing Acrylates. In *proceeding of Glass performance days 2009*. pp. 254–255.
- [65] Puller, K. & Sobek, W., 2008. Glass-Steel Connections Using Acrylate Adhesives. In *Challenging Glass*.
- [66] Richards, T., 2013. Solving Contact Problems with Abaqus. , (March).
- [67] Santarsiero, M., 2011. *Novel Laminated Connections*,
- [68] Santarsiero, M., Louter, C. & Lebet, J., 2013. Parametric numerical investigation of adhesive laminated point connections. In *COST Action TU0905, Mid-term Conference on Structural Glass*.
- [69] Seel, D.M. & Siebert, G., 2011. Experience with adhesives in term of structural use of glass in Germany. In *Glass Performance days 2011*. pp. 4–7.
- [70] Siebert, B., 2007. Safety aspects of point-fixed glass constructions. , pp.432–436.
- [71] Spaggiari, A., 2009. *EFFICIENT MODELLING OF COMPLEX ADHESIVELY BONDED STRUCTURES BY STANDARD FINITE ELEMENT TECHNIQUES*. PhD school of High Mechanics and Automotive Design and Technology, Modelling and Mechanical Design Methods.
- [72] Tarallo, E. & Mastinu, G., FE analysis with 3D elements.
- [73] Tiegel, O., 2011. Innovative glass facades with functionality. In *Glass Performance days 2011*. pp. 494–496.
- [74] Ungermann, D. & Preckwinkel, E., 2010. Structural Behaviour of Hybrid Steel-Glass Beams. In *Challenging Glass*. pp. 485–496.
- [75] Veer, F., Janssen, M. & Nägele, T., 2005. The possibilities of glass bond adhesives. In *Glass Processing days 2005*. pp. 1–4.
- [76] Veer, F., Zuidema, J. & Bos, F., 2005. The strength and failure of glass in bending. In *Glass processing days*. pp. 1–3.
- [77] Watson, J., 2010. Investigations into steel-glass adhesive joints. , (June), pp.0–58.
- [78] Watson, J. & Overend, M., 2011. Novel Connections for Steel-Glass and Glass-Glass Structures. In *Glass Performance Days*. pp. 2–5.
- [79] Weller, B. et al., 2009. Glass Steel Beams-Development of Hybrid Structures. In *Proceedings of Glass Performance Days*. pp. 435–439.
- [80] Weller, B., Meier, A. & Weimar, T., 2010. Glass-Steel Beams as Structural Members of Façades. In *Challenging Glass 2*. pp. 517–524.

- [81] Weller, B. & Schadow, T., 2007. Designing of bonded joints in glass structures. In *Glass Performance days 2007*. pp. 74–76.
- [82] Weller, B. & Vogt, I., 2008. Calculating Bonded Joints with Acrylates. In *Challenging Glass*.
- [83] Weller, P.B. & Kothe, D.C., 2011. Investigation of surface modification methods to improve adhesive joints in glass construction. In *Glass Performance days 2011*. pp. 677–680.
- [84] Weller, P.B. & Vogt, D.I., 2009. Determination of Material Properties for Light- Curing Acrylates. In *proceeding of Glass performance days 2009*. pp. 363–365.
- [85] Weller, P.B. & Weimar, D.T., 2011. Development of a new façade system with hybrid glass-steel elements. In *Glass Performance days 2011*. pp. 522–524.
- [86] Weller, P.B. & Weimar, D.T., 2007. Glass-polycarbonate-sandwich-elements as overhead glazing. In *Glass Performance days 2007*. pp. 464–467.
- [87] Weller, P.B., Weimar, D.T. & Härth, D.K., 2009. Hybrid Components of Glass and Polycarbonate. In *proceeding of Glass performance days 2009*. pp. 144–148.
- [88] Wellershoff, F., 2009. Engineering , Design And Erection Of Complex Steel Glass Structures. In *proceeding of Glass performance days 2009*. pp. 429–432.
- [89] Wellershoff, F. & Sedlacek, G., 2005. Glued connections for new steel glass structures. In *Proceedings of Glass processing days 2005*. pp. 3–6.
- [90] Wierzbicki, T., 2.081J/16.230J Plates and Shells.
- [91] Wurm, J., 2007. *Glass structures: design and construction of self-supporting skins*, Basel - Boston - Berlin: Birkhauser.
- [92] Zachariah, A.B.U.T., 2006. Finite Element Modelling of Adhesive Interface between Steel and CFRP Master ' s Thesis in the International Master ' s Programme in structural Engineering.
- [93] Zupan, D., Srpčič, J. & Turk, G., 2007. Characteristic value determination from small samples. *Structural Safety*, 29(4), pp.268–278.