



Получена: 30.06.2022 г.

Приета: 11.08.2022 г.

## СТРУКТУРА НА ЧЕРУПКОВИ КОНСТРУКЦИИ ОТ ДЪРВЕСИНА

М. Арнаудов<sup>1</sup>

*Ключови думи:* черупкови конструкции от дървесина, структура, решетъчна, клетъчна, плътна структура

### РЕЗЮМЕ

Съвременните черупкови конструкции от слепена дървесина намират приложение при решаването на конструкцията на широкоплощни сгради и такива със свободна архитектурна форма. Детайлното изследване на структурата на черупковите конструкции от дървесина би могло да улесни процесите на проектиране, заводска заготовка и монтаж на този тип конструкции. Класифицирани са различните структури на черупковите конструкции в четири групи – решетъчни, клетъчни, плътни и смесени. Разгледани са примери на реализирани обекти, подбрани по спецификата на структурата на конструкцията им. Изследвани са основните геометрични характеристики на видовете структури, гравитивните им компоненти (модул), слоевете им и детайлът на връзката между тях. Налице са иновативни решения, както за гравитивния модул, така и за детайла на връзката между модулите. Систематизирани резултати представят развитието и тенденциите за усъвършенстване на структурата на черупковите конструкции от дървесина.

### 1. Въведение

Черупковите конструкции от дървесина са елегантно решение за конструкция на сгради със свободна архитектурна форма и при големи подпорни разстояния. *В съвременното общество качественият скок в технологичното развитие преобразува всички проявления на материалната и духовната култура. Пред архитектурата се поставят нови задачи с постоянно повишаващи се изисквания от функционално-утилитарен и художествено-естетически характер [1].* Подобренията в техническите характеристики

---

<sup>1</sup> Михаил Арнаудов, ас. арх., кат. „Технология на архитектурата”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: mihail.g.arnaudov@gmail.com

на съвременните строителни материали от дървесина и възможностите за реализирането на възловите съединения са предпоставка за широк диапазон на приложение на този тип конструкции. Детайлният анализ на структурата на черупковите конструкции от дървесина би могъл да представи предполагаемите им предимства при реализации на широкоплощни обществени и производствени сгради. Сферата на приложение на конкретната строително-конструктивна система се определя от функционалното предназначение, технологичните изисквания, инсталационните особености, безопасността при пожар и безопасността на труда, наличните строителни технологии, опазване на околната среда, инвестиционните и експлоатационните разходи, и естетиката на архитектурната форма [2].

С настоящия анализ се цели изследване и класифициране на различните видове структури на черупковите конструкции от дървесина (ЧКД), да се обследват слоевете им и да се систематизират възможностите за детайлна връзка между отделните елементи. Подобна синтезирана информация би могла да спомогне процесите на проектиране, заводска заготовка и монтаж на черупковите конструкции от дървесина. Акцент е поставен на съвременни конструктивни решения със слепена дървесина, но предвид разгледачите реализации от XX век, не са изключени реализирани примери с инженерна дървесина.

Използваните методи са анализ и синтез, като са изследвани структурите на реализирани сгради с ЧКД от 20-те години на XX век до днес. Класифицираните структури са разделени в четири групи – решетъчна, клетъчна, плътна и смесена. Изведени и систематизирани са слоевете и детайлите на пространствените възлови съединения при всяка структурна група. Направени са предположения за бъдещи насоки на развитие на структурите.

Основните характеристики на архитектурната конструкция са конструктивна структура (структура), градивен модул на конструктивната структура, конструктивен елемент, детайл на пространственото възлово съединение, начин на пренасяне на усилията в конструкцията и начин на укрепване на конструкцията.

В статията се разглежда структурата (или конструктивната структура) на черупковите конструкции от дървесина. Съставните елементи са дефинирани като градивен модул на структурата, а възловите съединения са връзките между градивните модули на структурата. Класификационните групи са възприети, както са описани от проф. арх. М. Ангелов в „Архитектурни конструкции“ [3] – решетъчна, клетъчна, плътна структура и допълнена със споменатата от него смесена (конструктивна) структура. Необходимо е да се подчертае разликата в употребата на термина „структура“ или „конструктивна структура“, тъй като в тази статия се визира структурата на конструкцията, а в монографията на проф. Ангелов се класифицира конструктивната структура спрямо целия архитектурен обем.

## **2. Видове структури на черупкови конструкции от дървесина (ЧКД)**

Характерната форма на тънкостенните черупкови конструкции ги определя като основен елемент на архитектурната композиция на обектите с този вид конструкция [4].

Основен признак за класифициране на конструкциите е тяхната конструктивна структура. Разгледани са примери на посочените три вида конструктивна структура за сгради и съоръжения, реализирани с черупкови конструкции от дървесина. Предложена е и четвърта група с пример със смесена конструктивна структура.

## **2.1. Решетъчна структура при черупкови конструкции от дървесина**

Решетъчната структура при черупковите конструкции от дървесина е изградена от линейни елементи, които се пресичат в пространствено възлово съединение. Решетъчната структура е характерна за почти всички черупкови конструкции от дървесина, реализирани преди 2000 година. Сред причините са, че са реализирани с инженерна дървесина (предимно летви – еднослойно, двуслойно и т.н.) и стандартни крепежни елементи – пирони, винтове, шпилки и др.

След 2010 г. черупковите конструкции с решетъчна структура търпят развитие, като сред причините за това са материалите от слепена дървесина, новите технологии за прецизно изготвяне на пространствени възлови съединения, BIM проектирането и заводската заготовка с ЦПУ машини.

### **Решетъчна еднослойна структура (системата Цолингер, 1924 – днес)**

Системата Цолингер е приложена за първи път през 20-те години на XX век. Тя представлява еднослойна структура, формирана от дъски. Геометричният модул, който може да се проследи в структурата ѝ, е триъгълен. Системата Цолингер има и съвременна модификация, която се прилага и днес. Пространствената позиция на конструктивните елементи е сходна, подобренията са в насока на използваната дървесина и крепежни елементи.

Трудностите при изграждането на подобна конструкция са сложният кофраж, огромната възможност за натрупване на грешки при изпълнението, липсата на технологичност на изпълнението, изпълнение на местостроежа. Споменатите казуси водят до трудоемко и икономически нецелесъобразно изпълнение на подобни решения и това е част от причините за ограничената реализация.

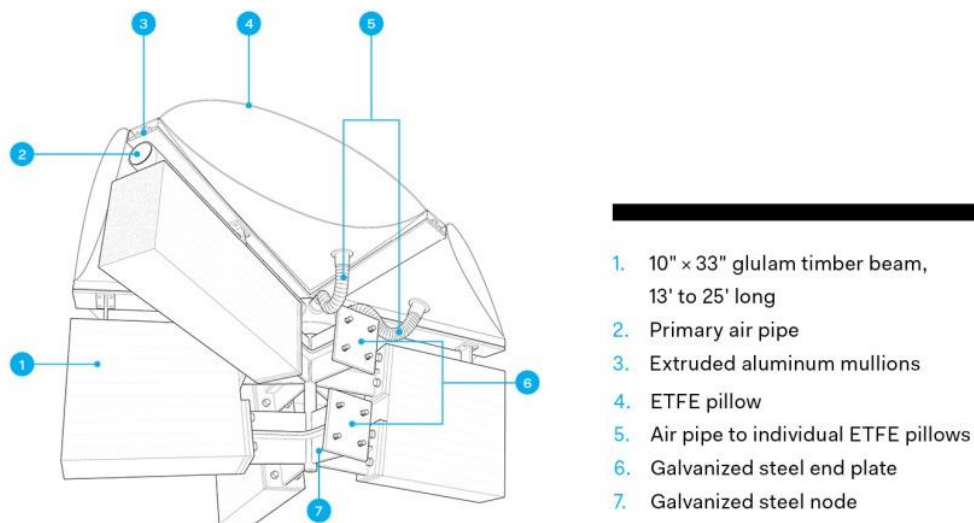
### **Решетъчна двуслойна структура**

Следващ етап в развитието на решетъчната структура на черупковите конструкции от дървесина е двуслойната. Сред първите реализации на подобна черупкова конструкция е Мултисхале на проектанта Фрай Отто от 1975 г. Голям брой обекти с двуслойна структура се реализира около 2000 г., като в тези години детайлът получава и модификация, като е добавено дървено бичме между двата слоя с цел допълнително пространствено укрепване на конструкцията и повишаване на носимоспособността на сечението. Подобен реализиран пример е покритието над “Savill gardens”, Уиндзор, Англия, построено през 2006 г. Изпълнението на тези конструкции е предшествано от сглобяването им на местостроежа и повдигането им до проектната кота в последствие. Това решение е възможно поради изменяемото възлово съединение (с прави планки и болтове). Укрепването е ставало след изправяне на конструкцията и се е осъществявало чрез укрепване по контура на стъпване, допълнено с укрепване с мембрана (обшивка или плоскост) или чрез диагонали.

Решетъчната двуслойна структура показва развитието в технологията на изпълнение, детайла на структурата на конструкцията и детайла на възловото съединение. Въпреки подобренията остават казусите със сложното изпълнение на възловите съединения, които са съставени от три броя планки и четири болта, сложното пресичане на 2×2 летви (бичмета) във възела и казусът с необходимостта от допълнително пространствено укрепване.

## Решетъчна еднослойна структура с неизменяем твърд възел с метални пространствени възлови съединения

Решетъчна еднослойна структура с неизменяем твърд възел с метални пространствени възлови съединения е съвременно решение, което е с подобрени конструктивни характеристики и подобрена технологичност – възможност за заводска заготовка. Казузите, които възникват при това решение, са в няколко насоки. От архитектурен аспект на първо място е визията на детайла, която е необходимо да бъде прецизирана още в началните етапи на проектиране, тъй като тези възлови съединения обикновено са видими в интериора.



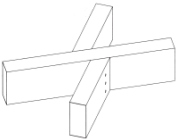
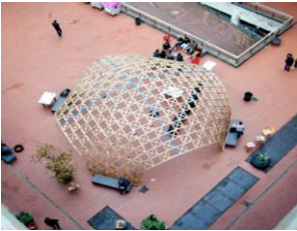





















Фиг. 1. Решетъчна еднослойна структура с неизменяем твърд възел, Лондон, Foster and partners [5]. Източник: [www.fosterandpartners.com](http://www.fosterandpartners.com)

Таблица 1 представя синтезирана информация за подвидове решетъчни структури. Примерите са изследвани в следните насоки – обща визия на конструкцията, структура на конструкцията, детайл на съединението и слоеве на градивния модул на структурата. Съпоставката цели да синтезира информацията за някои от възможностите за решения, без да претендира за изчерпателност, предвид постоянните иновации в тази насока. Разгледаните примери са подредени в хронологичен ред с цел изследване на развитието им в споменатите насоки. Всички разгледани обекти са реализирани, част от тях са макети на конструкции в реален размер.

Решетъчната структура е най-разпространеното решение за структура на черупкова конструкция. Водещите причини са конструктивни и технологични. Трудност при изпълнението им представлява пространственото възлово съединение.

Таблица 1. Решетъчна структури при черупкови конструкции от дървесина

Решетъчна структура при черупкови конструкции от дървесина			
Изглед	Структура	Детайл съединение	Слоеве гр. модул/ материал
 <p>Система Цолингер [6]</p>			<p>Ромбовидна решетка, <math>d = 80</math> cm равномерна. Ребра 4/10 cm. Укрепване чрез дъсчена обшивка</p>
 <p>Решетъчна черупка „Толедо“, Италия [7]</p>			<p>Ортогонална решетка, 2×2 слоя летви, укрепена с диагонали</p>
 <p>„Weald and Downland“ Музей, Англия [8]</p>			<p>Ортогонална решетка, 2×2 слоя летви, с детайл на съединението с прави планки (из- меняем възел)</p>
 <p>„Креод“ павилион, Лондон [9]</p>			<p>Равномерна шестоъгълна решетъчна структура, еднослойна (дъски), монтирани чрез винтове</p>
 <p>Помпиду – Мец [10]</p>			<p>Неравномерна шестоъгълна решетъчна структура, двуслойна с извити летви, усиление с дървено трупче</p>

 <p>“Chiddingstone” оранжерия [11]</p>			<p>Ромбовидна равномерна решетка, двуслойна с летви, усиление с дървено трупче. Укрепване чрез метални възжета</p>
 <p>Каравелна решетъчна структура, Франция [12]</p>			<p>Неравномерна шестоъгълна решетъчна структура, еднослойна (греди), с твърд възел</p>
 <p>“Crossrail Place”, Лондон [5]</p>			<p>Равномерна триъгълна решетъчна структура, еднослойна (греди Glulam), с твърд метален възел</p>
 <p>Подслон в Westonbirt, Англия, [13]</p>			<p>Решетъчна структура – пресечена. Двуслойна – с летви и усиление с дървено трупче</p>

## 2.2. Клетъчна структура при черупкови конструкции от дървесина

### Клетъчна структура при черупкови конструкции от дървесина на HexBox Canopy [14]

Клетъчната структура на черупковите конструкции от дървесина обикновено е формирана от отделни градивни модули, свързани помежду си с крепежен елемент. Този тип структура на конструкцията е сравнително нова тенденция и възниква като решение в отговор на търсенето на унифицирани предварително заготвени градивни модули.

Конструкцията на “HexBox Canopy” [14] е реализирана посредством пространствени градивни модули, направени от LVL панели. Връзката между елементите е осъществена чрез клинове от LVL. „Пространствената структура има експериментален ха-

ракер и цели да демонстрира възможностите на конструктивното решение. Реализацията представлява интерес поради тенденция, която представя изпълнение на сложна пространствена структура чрез предварително изготвени в заводски условия пространствени конструктивни елементи (модули)“, [14].



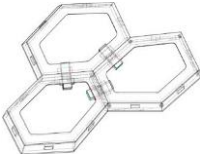


Този тип клетъчна структура представя нови възможности за технологията на изграждане на черупковите конструкции от слепена дървесина – чрез отделни унифицирани модулни конструктивни елементи (градивен модул), които се монтират чрез дърводелска сглобка (с трето парче) един към друг. Недостатък е сложното изграждане на всеки един отделен модул и забавянето, което възниква от сглобяването им един по един.

### Клетъчна структура при черупкови конструкции на Multipurpose Hall Manternach [15]

Конструкцията на Multipurpose Hall Manternach, Annien [15] е предварително заготвена като цели елементи – черупки с единична кривина, което оптимизира времето за монтаж. Клетъчната структура на конструкцията е съставена от LVL панел  $d = 40 \text{ mm}$ , като в случая отделните клетки са затворени от четирите им страни, с цел постигане на по-добри конструктивни характеристики и намаляване на броя операции за изпълнение на конструкцията, чрез отпадането на пробиването на долната LVL плоскост.

Таблица 2 представя синтезирана информация за подвидовете клетъчни структури, разгледани от автора.

Таблица 2. Клетъчна структура при черупкови конструкции от дървесина

Клетъчна структура при черупкови конструкции от дървесина			
Изглед	Структура	Детайл съединение	Слоеве гр. модул/ материал
 <p>“HexBox Canopy” [14]</p>		 <p>С дървен клин</p>	<p>Пространствени градивни модули от LVL панели.</p> <p>LVL панел, <math>d = 40 \text{ mm}</math></p>
	 <p>Зала в Анниен – с дървод. сглобка [15]</p>		<p>Пространствени градивни модули от LVL панели.</p> <p>LVL панел, <math>d = 40 \text{ mm}</math></p>

### 2.3. Плътна структура при черупкови конструкции от дървесина

В монографията „Посланията на конструкцията“ (стр. 45) този тип конструкции са дефинирани като „Материя, която може сама да запазва формата под действието на външни сили (самодефинираща се). Тя изпълнява едновременно носеща и ограждаща функция“ [16].

Таблица 3 представя синтезирана информация за подвидовете клетъчни структури, разгледани от автора.

**Таблица 3. Плътна структура при черупкови конструкции от дървесина**

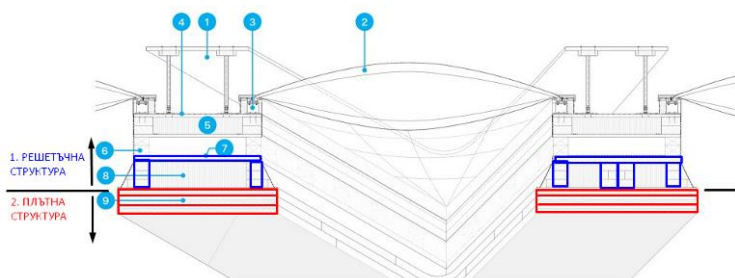
Плътна структура при черупкови конструкции от дървесина			
Изглед	Структура	Детайл съединение	Слоеве гр. модул/материал
 <p>Изложбена зала, Щутгарт [17]</p>		 <p>С дърводелска сглобка и дибли</p>	Плоскости от шперплат, бук, $d = 50 \text{ mm}$
 <p>Recycleshell Университет Кайзерслаутерн [18]</p>		 <p>С дърводелска сглобка с трето парче и дибли</p>	CLT панел

Плътна структура на конструкцията е най-съвременното проявление на черупковите конструкции от дървесина. Тя е резултат от конструктивните свойства на съвременни материали като LVL и CLT и от възможностите за заготовка с ЦПУ машини.

## 2.4. Смесена конструктивна структура на черупковите конструкции от дървесина

Разгледаният пример е на черупкова конструкция от слепена дървесина с плътна CLT структура, която е допълнително укрепена с мрежа от GLULAM греди.

С цел постигане на необходимата коравина в черупковата конструкция са използвани трислойни CLT панели с дебелина 80 mm, като в зоните на контакт между панелите те са зарязани под  $60^\circ$  ъгъл спрямо посоката на носене и монтирани с винтове за дърво. За допълнително стабилизиране на конструкцията върху основните носещи „лъчи“ са монтирани главни извити греди от слепена дървесина със сечение  $24 \times 32 \text{ cm}$ , а навсякъде около отворите са монтирани греди от слепена дървесина със сечение  $24 \times 16 \text{ cm}$  с цел стабилизиране на отворите. Покривното покритие на конструкцията е оформено от LVL панел с дебелина 57 mm, монтиран върху главните греди. Общата дебелина на покривния пакет е 54 cm [19].



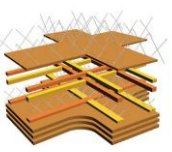


1. 33mm Kerto Q LVL protective panel
2. ETFE cushion, three-ply with hail-proof layer
3. Integrated aluminum gutter
4. Sarnafil TG 76-18 Felt roof membrane
5. 160mm mineral fiber insulation
6. Wood blocking
7. Roof underlayment
8. Box girder wood and insulation
9. Cross-laminated spruce panels, three layers

**Фиг. 2.** Детайл на структура на Зоопарка в Цюрих [19].  
Източник: [www.architectmagazine.com](http://www.architectmagazine.com)

Таблица 4 представя синтезирана информация за подвидовете клетъчни структури, разгледани от автора.

**Таблица 4.** Смесена структура при черупкови конструкции от дървесина

Плътна структура при черупкови конструкции от дървесина			
Изглед	Структура	Детайл съединение	Слоеве гр. модул/ материал
 <p>Зоопарка в Цюрих, Швейцария [19]</p>			<ol style="list-style-type: none"> <li>1. CLT панели с дебелина 80 mm,</li> <li>2. греди от слепа дърв. Сеч. 24 × 32 cm,</li> <li>3. LVL панел с дебелина 57 mm</li> </ol>

### 3. Анализ и обобщение на видовете конструктивна структура при черупкови конструкции от дървесина (ЧКД)

#### Решетъчна структура при ЧКД

Разгледаните примери на реализирани ЧКД с решетъчна структура бихме могли да разделим на две подгрупи – еднослойни и двуслойни (многослойни). При еднослойна структура на ЧКД имаме един конструктивен слой на решетката – дървено ребро, дъска, летва, бичме или греда от дървесина (слепа). Двуслойната (многослойна) структура на

ЧКД се състои от два или повече слоя, формиращи съставно сечение на решетката на конструкцията. При разгледаните примери се виждат реализирани черупки със съставно сечение, формирано от два слоя летви или два слоя летви, усилен с дървено трупче.

### **Еднослойна решетъчна структура при ЧКД**

Разгледаните примери, с еднослойна структура на конструкцията, подредени по хронологичен ред на годината на изграждането им, са:

- Сград,а изградена по Система Цолингер [6] – 1924 г.;
- „Креод“ павилион, Лондон [9] – 2012 г.;
- “Crossrail Place“, Лондон [5] – 2015 г.;
- „Каравелна“ решетъчна структура, Франция [12] – 2020 г.

Сградите, изградени по Система Цолингер от началото на ХХ век, са сред първите примери на черупкови конструкции от дървесина. Конструктивната им структура е решетъчна, като тя е била изградена от наличните материали – ребра, дъсчена обшивка и пирони.

#### **Формообразуване / изграждане на кривината / гравивен модул / детайл на възела**

Полуцилиндричната повърхнина на сградата, изградена по Системата Цолингер [6], както и при “Crossrail Place“, Лондон [5], е решена с черупкова конструкция с единична кривина с решетъчна еднослойна структура. При сградата, изградена по Системата Цолингер [6], структурата се състои от дървени ребра с приблизителна дължина 1,5 m и сечение 5/10 cm, които са завъртяни под ъгъл спрямо равнината и по този начин оформят характерната ромбовидна решетъчна еднослойна структура. Кривината на повърхнината е постигната чрез избичване на краищата на ребрата, което ги прави с променливо сечение по дължината им. Детайлът на връзка между ребрата е решен с пирони, като към едно цяло ребро странично забиват челата на други две ребра (виж таблица 1). Укрепването се осъществява чрез мембрана – дъсчената обшивка.

Еднослойната структура на черупковата конструкция на „Crossrail Place“, Лондон [5] се състои от греди от слепена дървесина GLULAM, със сечение прилб. 240/800 mm. Структурата представлява решетка от триъгълни фасети (модули). Подпорното разстояние е приблизително 30 m, конзолното излизане по късите страни на полуцилиндричната повърхнина –прилб. 15 m. Триъгълната геометрична форма на модула на структурата на черупковата конструкция спомага за елегантното вписване в обемното решение на конзолното излизане и естественото отвеждане на усилията от конзолата към фундамента, посредством наклонените конструктивни елемент на решетката. Детайлът на връзка между отделните гравивни елементи представлява предварително заготвен пространствен метален възел.

„Креод“ павилион, Лондон [9] и „Каравелна“ решетъчна структура, Франция [12], са съоръжения с черупкова конструкция с двойна кривина и решетъчна еднослойна структура. „Креод“ павилион [9] има еднослойна шестоъгълна решетъчна структурата. Основният гравивен модул е изграден от пространственото пресичане на три линейни елемента (дъски), скрепени помежду си с винтове. Монтажът на три подобни модула, един към друг, формира характерните шестоъгълни форми на решетката. Кривината на повърхнината се постига чрез геометрията на гравивния модул. Решенията, които представляват интерес при „Каравелната“ решетъчна структура, Франция [12], са възловите съединения – в случая има възлово съединение с „трето парче“ (дървено) или формиране на възел посредством добавяне на две дървени плоскости.

Основен казус при изграждането на еднослойната решетъчна структура при ЧКД представлява проектирането и изграждането на възловото съединение. Сред разгледаните примери откриваме разнообразни възможности за решението му. Обикновено чрез възловото съединение се задава и кривината на повърхнинната.

### **Двуслойна решетъчна структура при ЧКД**

Разгледаните примери с двуслойна структура на конструкцията, подредени по хронологичен ред на годината на изграждането им, са:

- „Weald and Downland“ Музей, Англия [8] – 2002 г;
- „Chiddingstone“ оранжерия [11] – 2007 г.;
- Център Помпиду – Мец [10] – 2010 г.;
- Решетъчна черупка „Толедо“, Италия [7] – 2012 г.;
- Подслон в Westonbirt, Англия [13] – 2022 г.

Силен период за реализациите с двуслойна решетъчна структура е началото на XXI век, в Англия. В последните години по-сложният монтаж и затрудненията от технологична гледна точка намаляват подобни реализации, но не липсват и съвременни.

### **Формообразуване / изграждане на кривината / гравивен модул / детайл на възела**

„Weald and Downland“ Музей, Англия [8], „Chiddingstone“ оранжерия [11] и Решетъчната черупка „Толедо“, Италия [7] – 2012 г. са примери за ЧКД с двуслойна решетъчна структура и с двойна кривина. Повърхнините, формирани от ЧКД при Център Помпиду – Мец [10] и Подслон в Westonbirt, Англия [13], биха могли да се класифицират като свободна форма. Структурата на примерите с ЧКД с двойна кривина е ортогонална, докато структурата на Подслон в Westonbirt, Англия [13], е неравномерна. Конструктивните елементи от решетката, в изброените примери, са формирани със съчетано сечение – летва/бичме за укрепване/летва. Този тип сечение дава възможност за полесен за изпълнение детайл при контакта на отделните елементи на решетката.

Предимствата на примерите, реализирани с двуслойна структура пред еднослойната решетъчна структура, са:

- Намаляване на разхода на материал.
- Опростяване на детайла на възловото съединение, от което вероятно следва възможност за изграждане на по-сложни форми, в т.ч. свободна форма на повърхнинната.

Основен недостатък на двуслойната решетъчна структура пред еднослойната решетъчна структура е по-сложното и нетехнологично изпълнение.

### **Клетъчна структура при ЧКД**

Разгледаните примери с клетъчна структура на конструкцията, подредени по хронологичен ред на годината на изграждането им, са:

- Слънцезащитен навес “HexBox Canopy“ [14] – 2019 г.
- Зала в Анниен [15] – 2020 г.

Реализациите имат експериментален характер, те са разработени от научни екипи от Техническия университет в Кайзерслаутерн и от Техническия университет в Цюрих.

Изграждането на тези черупкови конструкции от слепена дървесина е изпълнено с помощта на проектиране в BIM среда, заводска заготовка с ЦПУ машини, съвременните материали от дървесина и съвременните крепежни елементи.

#### **Формообразуване / изграждане на кривината / градивен модул / детайл на възела**

Повърхнината на слънцезащитния навес “HexBox Canopy“ [14] е с двойна кривина, докато тази на Зала в Анниен [15] е с единична кривина. Тенденцията, която би могла да се отчете, е формирането на градивни модули на конструкцията, което от своя страна улеснява заводската заготовка на елементите и монтажа им. И в двата примера кривината на повърхнината се постига чрез формата на самия градивен модул. Връзките между отделните градивни модули са решени с дърводелски сглобки (фрезоване с ЦПУ машини, дибли, трето парче дървесина и др.), което от своя страна оптимизира разходите и улеснява изпълнението. Уедряването на градивния модул (Зала в Анниен [15]) е правопрпорционално на технологичността на изпълнението, но ограничава възможностите за формообразуване.

#### **Плътна структура при ЧКД**

Разгледаните примери с плътна структура на конструкцията, подредени по хронологичен ред на годината на изграждането им, са:

- Изложбена зала, Щутгарт [17] – 2014 г.,
- Recycleshell Университет Кайзерслаутерн [18] – 2019 г.

Реализациите имат експериментален характер, те са разработени от научни екипи от Техническият университет в Кайзерслаутерн и от Техническият университет в Щутгарт. Изграждането на тези черупкови конструкции от слепена дървесина е възможно благодарение на проектиране в BIM среда, заводска заготовка с ЦПУ машини, съвременните материали от дървесина и съвременните крепежни елементи.

#### **Формообразуване / изграждане на кривината / градивен модул / детайл на възела**

Изложбената зала в Щутгарт [17] и на Recycleshell [18] са решени с черупкови конструкции с двойна кривина на повърхнината. Кривината е решена чрез зарязване под ъгъл на контура на отделните градивни модули на конструкцията – изградени от CLT панели. Плътната структура на конструкцията е постигната именно чрез материала от слепена дървесина. CLT панелите са предварително заготовени, в заводска среда с ЦПУ машини. Иновативно решение е приложено и при връзката между панелите – чрез фрезование на контура на всички отделни градивни модули и с дърводелска сглобка.

#### **Смесена структура при ЧКД**

Разгледаният пример с клетъчна структура на конструкцията е Зоопарка в Цюрих, Швейцария [19], реализиран през 2014 г.

#### **Формообразуване / изграждане на кривината / градивен модул / детайл на възела**

Черупковата конструкция от слепена дървесина на Зоопарка в Цюрих, Швейцария [19], е с двойна кривина. Специфичното при формообразуването ѝ са характерните отво-

ри със свободна форма. Отворите са водеща причина за приложението на смесена структура на ЧКД. Перфорирането на плътната черупка от CLT панели, е наложило укрепване с втори слой на структурата – решетка от греди от слепена дървесина GLULAM.

Резултатът от комбинирането на плътна и решетъчна структура е впечатляващата черупкова конструкция с двойна кривина на повърхнината и значителен брой отвори с аморфна форма в нея. Реализацията е с впечатляваща архитектурна визия, но може да се отчете и значително повишава сложността на изпълнението ѝ – поради изграждане на смесена структура (първо плътна структура, след това решетъчна), липсата на унификация на елементите и на уеднаквен модул, което допълнително затруднява и оскъпява изпълнението.

Четири разгледани структури на ЧКД, и техните подварианти, разкриват различни възможности за реализиране на сложни пространствени форми. В практиката е налична информация за реализирани примери с решетъчна (еднослойна и двуслойна), клетъчна, плътна и смесена структура. Съвременният подход за проектиране и изпълнение, в комбинация със съвременните материали, води до революционно нови решения при реализациите с черупкови конструкции от дървесина.

## 4. Заключение

Проучването доказва няколко тенденции:

- Възможността за изграждане на обемно-пространствени решения със сложна свободна форма и оптимизиране на подобни форми посредством извеждане на унифицирани градивни модули на конструктивната структура.
- Унифицирането на градивните модули на конструктивната структура би улеснило проектирането, заготовката и монтажа на черупковите конструкции от дървесина, което спомага за по-широкото им приложение.
- При плътна конструктивна структура на черупковите конструкции от дървесина, заводската заготовка с машини с цифрово програмирано управление (ЦПУ), има тенденцията за фрезование на контура на плътните конструктивни елементи, така че да се постигнат дърводелски сглобки – тип лястовича опашка, нут и перо, сглобка с дибли, сглобка с трето парче и други.
- В допълнение на тенденциите за енергийно-ефективно проектиране и строителство, модулността на конструктивните структури при черупковите конструкции дава възможност в пълнежите на отделните модули да се интегрират фотоволтаични елементи. Според класификацията, въведена от доц. Кутова, би се отнесло към интегриране на фотоволтаичните елементи, вместо елементи на сградната обвивка – в случая пълнеж на отделните модули [20].

Детайлното изследване на основните характеристики на конструктивната структура на черупковите конструкции от слепена дървесина би могло да доведе до оптимизация на процесите на проектиране, заводска заготовка и монтаж. Предложената класификация за конструктивна структура включва реализирани примери с решетъчна, клетъчна, плътна и смесена конструктивна структура. Изследването показва широко разпространение на решетъчната структура и тенденция за изграждане на сгради с кон-

струкция с плътна или смесена структура. Основен казус е надеждната връзка между отделните градивни модули на структурата. Тенденцията е за изграждането им с плътни елементи от слепена дървесина – CLT панел или LVL плоскости, които спомагат и за укрепването на конструкцията и фрезование на тези панели за постигане на дърводелски сглобки, с цел намаляване на броя на допълнителните крепежни елементи. Извеждането и унифицирането на градивните модули на структурата е основен момент при оптимизацията, която спомага за заводската заготовка на конструкцията.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Koseva, D.* Applications of Textile Membrane Structures in Heritage Buildings and Areas. IXth Scientific Conference “Modern technologies in the cultural-historical heritage“, ISSN: 2367-6523, June 2022, Technical University, Sofia, pages 122-128.

2. *Maznikov, A.* Sustainable Design of Skylights for Industrial Buildings, scientific report, Xth Jubilee International Scientific Conference Civil Engineering Design and Construction (Science and Practice), September 20-22, 2018, Varna, Bulgaria, ISSN 2603-4255, Bulgarian Scientific and Technical Union of Civil Engineering (NTSSB), S., 2018, pages 688-699.

3. *Angelov, M.* Architectural constructions, National publisher "Tehnika", 1989.

4. *Maznikov, A.* CONTEMPORARY WAREHOUSE BUILDINGS AND DISTRIBUTION CENTRES. Published by UACEG, Sofia, Bulgaria, C., 2019, 160 p., ISBN 978-954-724-118-3 – printed and ISBN 978-954-724-119-0 – on CD.

5. Crossrail Place, Canary Wharf, London, Foster and partners, [www.fosterandpartners.com](http://www.fosterandpartners.com).

6. *Zollinger, Fr.* Gallery Mother Fourage. [https://holzbauatlas.berlin/galerie-munter-fourage\\_friedrich-zollinger/](https://holzbauatlas.berlin/galerie-munter-fourage_friedrich-zollinger/), accessed 01.06.2022.

7. *B. D'Amico, A. Kermani, H. Zhang, A. Pugnale, S. Colabella, S. Pone,* Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure. // Journal Structures, 2015, p. 227-235, ISBN 2352-0124.

8. Weald and Downland Museum, Singleton, UK, <https://www.wealddown.co.uk/buildings/downland-gridshell/#history>, accessed 15.06.2022.

9. Kroed / Chun Qing Li of Pavilion Architecture, <https://www.archdaily.com/275460/kroed-chun-qing-li-of-pavilion-architecture>, accessed 15.06.2022.

10. Centre Pompidou-Metz / Shigeru ban Architects <https://www.archdaily.com/490141/centre-pompidou-metz-shigeru-ban-architects>, accessed 25.05.2022.

11. Chiddingstone, Peter Hulbert Chartered Architect, <https://carpenteroak.com/projects/chiddingstone-orangery/>, accessed 15.06.2022.

12. *Xavier Tellier, Cyril Douthe, Laurent Hauswirth, Olivier Baverel.* Caravel meshes: A new geometrical strategy to rationalize curved envelopes.

13. Westonbirt Community Shelter, <https://www.xylotek.co.uk/projects/westonbirt-shelter>, accessed 15.06.2022.

14. *Robelle, Chr.* HexBox Canopy. DTC, TU Kaiserslautern, October 2019, <http://www.architektur.uni-kl.de/dtc/2019/08/17/hexbox-canopy-sydney/>, accessed 15.04.2022.
15. Annen Head Office, Architects: Valentiny hvp architects, Remerschen. Yves Weinand, Liège. <https://www.epfl.ch/labs/ibois/projects/ongoing-projects/annen-head-office/>, accessed 15.06.2022.
16. Daskalova, Tzv. 2021. The messages of the structure. Sofia: Propeller Publishing House, Sofia, ISBN 978-954-392-664-0.
17. Landesgartenschau Exhibition Hall, University of Stuttgart, <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/landesgartenschau-exhibition-hall/>, accessed 17.06.2022.
18. *Robeller, Chr.* Recycleshell. DTC, TU Kaiserslautern, November 2019, <http://www.architektur.uni-kl.de/dtc/2019/09/05/recycleshell/>, accessed 25.05.2022.
19. *Hooper, E.* The journal of the American institute of architects, Kaeng Krachan Elephant Park Shell, Markus Schietsch architecten, October 2015, <https://www.architectmagazine.com/technology/architectural-detail/kaeng-krachan-elephant-park-shell>, accessed 15.03.2022.
20. *Kutova, G.* (2020). The building envelope of the 21st century Second revised and supplemented edition. ISBN 978-954-392-604-6. Sofia: Propeller Publishing House, Sofia, 2020, ISBN 978-954-392-604-6.

## STRUCTURE OF TIMBER SHELLS IN ARCHITECTURE

**M. Arnaudov<sup>1</sup>**

**Keywords:** *timber shells, structure of construction, lattice, timber barrel vaults*

### ABSTRACT

Contemporary wooden shell structures are used as a reliable solution for the realization of large-scale buildings and such with a free architectural form. A detailed study of the structure of this type of constructions could facilitate their design, fabrication and assembly processes. The different types of structure of the timber shells are classified into four groups – lattice, cellular, solid and mixed. The selected examples of realized shells are considered according to the specifics of the structure of their construction. The main geometric characteristics of the different types of structures, their building components (modules), their layers and the detail of the connection between the modules are studied. Innovative solutions are available, both for the building module and for the detail of the connection between the modules. The systematized results present the development and trends for the improvement of the structure of timber shells.

---

<sup>1</sup> Mihail Arnaudov, Senior Assist. Prof. Arch, Dept. “Technology of Architecture”, UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: mihail.g.arnaudov@gmail.com