



Получена: 10.09.2021 г.

Приета: 18.10.2021 г.

СЪВРЕМЕННИ ЧЕРУПКОВИ КОНСТРУКЦИИ ОТ СЛЕПЕНА ДЪРВЕСИНА

М. Арнаудов¹

Ключови думи: черупкови конструкции, архитектурни конструкции от слепена дървесина, конструкции от слепена дървесина

РЕЗЮМЕ

В миналото проектирането и изграждането на черупкови конструкции от дървесина е било предизвикателство. Но дигиталната ера създава изцяло нови възможности и материали, които оптимизират разходите и времето при проектирането, производството и монтажа на тези ефективни и елегантни конструкции. Налице са и нови технологични възможности за прецизно изготвяне на пространствените възлови съединения. Анализирани са тънкостенните и мрежестите черупкови конструкции от слепена дървесина като рационално решение за покриване на големи пространства без междинно подпиране. Направено е систематизиране на характеристиките и предимствата им. Разгледаните примери от европейската и световната практика са подбрани по спецификата на конструктивното им решение и тенденциите, които задават за изграждане на подобни съвременни структури.

1. Въведение

В съвременната строителна практика конструкциите от слепена дървесина намират широко приложение. С развитието на производството на строителни продукти от дървесина и подобряване на характеристиките им се дава възможност за реализацията на архитектурни конструкции със сложна геометрия. В анализираните примери се разглежда приложението на черупкови конструкции от слепена дървесина, като целта е да бъдат

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

изследвани предимствата и ограниченията им, спецификата в изграждането им, и да бъде дадена обобщена характеристика и хипотеза за следващи стъпки в развитието на този тип конструкции.

2. Черупкови конструкции от слепена дървесина

Подобни архитектурно-конструктивни решения представляват интерес за архитектите и инженерите, както поради тяхната конструктивна ефективност, така и поради елегантния им външен вид.

Тънкостенните пространствени конструкции обикновено се характеризират с крива повърхнина и статическа схема, работеща на натиск в няколко направления и разпъващи усилия в конструктивните елементи. Въпреки различните усилия, всички елементи на конструкцията работят едновременно в различните посоки. Едновременната работа на елементите на черупките води до оптимална работа на конструктивния модел и оптимизиране на сеченията на носещите елементи, често стигащи до 1/1000 от подпорното разстояние. Тези конструктивни форми водят до икономични решения по отношение на вложения материал и работа на конструкцията. Поради ясната конструктивна схема на този тип конструкции е изключително подходящо и приложението на слепена дървесина.

Дървесината е материал, който е многократно по-лек от бетона и метала и при изчистена конструктивна схема дава оптимални решения. Тънкостенните пространствени конструкции от слепена дървесина имат приложение както за покриване, така и за цялостно ограждане на пространства.

2.1. Строителни продукти от слепена дървесина и приложението им при черупкови конструкции

Подобрените технически характеристики на новите строителни материали от дървесина са причина за все по-широкото им практическо приложение в различни типове конструкции. Материалите, влагани в съвременните решения на сгради с черупкови конструкции от слепена дървесина, са:

Glulam (Glued laminated timber) – Слепената многопластова дървесина намира приложение в мрежестите черупкови конструкции като линеен конструктивен елемент, изграждащ мрежата. При гладките черупкови конструкции тя би могла да участва в укрепването на конструкцията (Пример – Зоопарк Цюрих, обрамчване на отворите в черупковата конструкция, оформяне на арки, които пренасят усилието и др.).

LVL – (Laminated veneer lumber) – **Пластова фурнирована дървесина** – плоскост от слепени фурнирни листове, с успоредно разположение на влакната на отделните листове. Пластовата фурнирована дървесина е алтернатива на слепената многопластова дървесина при приложението си при дървените скелетни и покривни конструкции. Предимството на материала е подобрената му носимоспособност, която е съпоставима с тази на стоманените конструкции. Недостатъците са значително по-високата цена на материала и фактът, че все още не може да се говори за масово производство, което затруднява и доставките.

CLT (X-LAM – Cross laminated timber) – плоскост или елемент от слепени дъски, с взаимно перпендикулярно разположение на влакната на отделните слоеве. **CLT** е продукт от дървесина, изработен от минимум три свързани слоя от дъски, ламинирани под прав ъгъл, който е предназначен за приложение както като носещ, така и като преграден елемент в покрив, под или стена.

Приложението на плоскостите от слепени дъски (ПСД) може да бъде разгледано в няколко аспекта – като носеща конструкция, като конструктивен елемент от дървена скелетна конструкция или като неносещ елемент от сградата – преградна стена, приложение като покривна плоскост при послоен монтаж.

2.2. Класификации на типове черупкови конструкции съгласно научната литература

- **Класификация на черупковите конструкции съгласно „Handbook 1 – Timber Structures“ [1], 2008, Leonardo da Vinci Pilot Project:**
 - черупкови повърхности с единична кривина;
 - черупкови повърхности с двойна кривина;
 - ротационни повърхности – куполи;
 - трансляционна черупкова повърхност – висящи черупкови структури.
- **Класификация на черупковите конструкции съгласно „Архитектурни конструкции“ [2], 1972, проф. арх. Атанас Попов:**
 - тънкостенни черупкови конструкции с единична кривина;
 - тънкостенни черупкови конструкции с двойна кривина;
 - ребрести и мрежести черупкови конструкции;
 - секториални черупки;
 - надиплени (нагънати) плоски черупки.
- **Класификация на черупковите конструкции съгласно „Архитектурни конструкции“ [3], 1996, проф. арх. Милко Ангелов:**
 - тънкостенни черупки с единична кривина;
 - тънкостенни черупки с двойна кривина;
 - тънкостенни вълнообразни черупки.
- **Според формата черупковите конструкции са:**
 - тънкостенни черупкови конструкции;
 - тънкостенни вълнообразни конструкции;
 - тънкостенни нагънати конструкции.

От всички изброени по-горе типове конструкции в световната практика могат да бъдат намерени реализации с използване на слепена дървесина. Освен конструктивните особености, основна трудност при проектирането и изпълнението им е обезпечаването на детайла на връзката между отделните елементи на структурата. От архитектурна гледна точка тези връзки в голяма степен определят визията на конструкцията, но е изключително важно обезпечаването ѝ от гледна точка на изискванията за пожарна безопасност, добро топло- и пароизолиране.

Мрежестите черупкови конструкции са специален тип конструкции, които съчетават конструктивна ефективност с привлекателен външен вид. Освен това те имат много ограничено въздействие върху околната среда, когато са проектирани правилно. Те могат да бъдат изградени и за сравнително кратко време, първоначално са изградени като плоска мрежа от линейни елементи и след това са били огъвани в желаната форма. Разглеждайки многобройните благоприятни свойства на мрежести черупкови конструкции от дървесина, човек би очаквал, че този вид конструкции ще са по-често срещани.

Въпреки това в момента в практиката могат да се видят само малък брой такива примери. Едно от обясненията за това е, че техните относително сложни форми са трудни за проектиране и не е имало ефикасна технология за прецизното им изпълнение, което е водело до трудности при изпълнението им.

2.3. Мрежести черупкови конструкции с двойна кривина, изпълнени с линейни елементи от слепена дървесина (Glulam)

Мрежестите черупкови конструкции се различават от гладките черупкови конструкции, тъй като се изграждат от линейни елементи, вместо от хомогенна непрекъсната повърхност. Елементите на решетката са свързани във възли, като по този начин оформят повърхност с двойна кривина. Решетката от елементи създава единна повърхнина, която обаче трябва да бъде пространствено укрепена от диафрагми или от контурна греда. За допълнително укрепване срещу срязващи сили за подобен тип решения се прилага непрекъснат слой, покриващ решетката (обшивка) или се използва диагонално укрепване, което триангулира решетката. Мрежестите черупки се оформят с изолационни слоеве, монтирани върху плътна основа или с прозрачни материали като стъкло или текстилна мембрана. „Прозрачността на оформящата повърхнина допринася за изявяване на структурните особености на основната носеща конструкция, които могат да бъдат преживени и оценени като художествено послание, както отвън, така и отвътре“ [4].

Пример: Закрит плуven басейн в Бад Орб, Германия – решен с мрежеста черупкова конструкция от линейни елементи от слепена многопластова дървесина. Конструкцията е елегантна и оформя както динамичната визия на аморфния обем, така и атрактивното интериорно пространство. Изборът на материал на конструкцията дава редица предимства – естетика, която се възприема в интериора, надеждност при експлоатацията и предвид агресивната строителна среда (закрит басейн) и конкурентно решение при прехвърляне на големи подпорни разстояния – 42 m на 65 m.

Таблица 1. Закрит плуven басейн, Bad Orb, Германия

Обект	Закрит плуven басейн, Bad Orb, Германия [5]
Архитект	Ollertz Architekten BDA
Година	Реализация – 2009 г.
Предназначение	Спорт и рекреация / Закрит плуven басейн
Размери	ЗП = 2,200 m ²
Тип конструкция	Мрежеста черупкова конструкция с двойна кривина от линейни елементи от слепена дървесина (Glulam)
Подпорно разстояние	42 m / 65 m
Покритие	Хидроизолационна мембрана

В план сградата е с неправилна аморфна форма, по контура ѝ са изпълнени ниски стоманобетонни шайби, към които е захваната мрежестата черупка от огънати елементи от слепена дървесина. Черупката е решена с огънати контурни греди от слепена дървесина със сечение 240/800 mm. Към контурната греда е монтирана мрежата от греди (някои прави, други – с различни радиуси) [5].

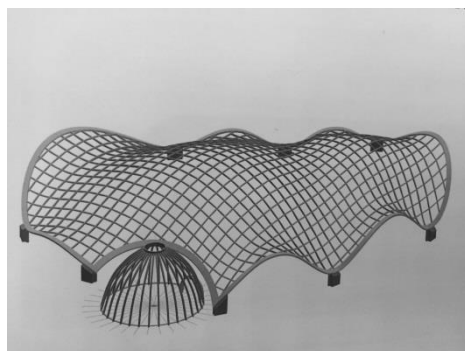


**Фиг. 1. Визуализация “Toskana thermal baths”, Германия, Ollertz Architekten BDA [5].
Източник: www.hess-timber.com**

С цел постигане на кривините от модела всички греди в мрежата са с дължина само през две полета и се захващат за друга напречна греда от мрежата. Връзките между гредите са изпълнени с винтове и прави планки, монтирани от горната страна на конструкцията, за да не останат видими в интериорното пространство на басейна, което е предимство от естетическа и експлоатационна (корозия) гледна точка.



А.



Б.

**Фиг. 2. А. План “Toskana thermal baths”, Германия, Ollertz Architekten BDA
Б. Аксонометрия конструкция “Toskana thermal baths”, Германия, Ollertz Architekten BDA [5].
Източник: www.hess-timber.com**

Сложната обемно-пространствена композиция е решена с елегантната, надеждна и икономична мрежеста черупковата конструкция от дървесина. Конструкцията се вписва естествено в обема и участва във формообразуването му, като предопределя характерна визия както в екстериора, така и в интериорното пространство. Изключително силно е естетическото въздействие на дървесината в интериорното решение.

За реализирането на аналогична структура със стоманена конструкция биха били необходими допълнителни обшивки, които да подобрят облика на конструктивните елементи в интериорното пространство. Подобно решение би усложнило детайла за изпълнение, което неминуемо води до допълнителни разходи и удължаване на периода за реализация. Друг възможен подход при решение със стоманена конструкция е конструктивните елементи да бъдат оставени видими (бойдисани), като безспорно визията им отстъпва пред видимата конструкция с дървесина.

Реализирането на подобна мрежеста черупкова конструкция със стоманобетон има редица недостатъци от естетическа и технологична гледна точка.

Важно е да се подчертае и прякото отношение между функционалното предназначение на сградата и избора на дървесината за материал на конструкцията. При закритите плувни басейни дървесината има предимство пред стоманата поради високия риск от корозия на металните елементи.



Фиг. 3. Интериор “Toskana thermal baths”, Германия, Ollertz Architekten BDA [5].
Източник: www.hess-timber.com

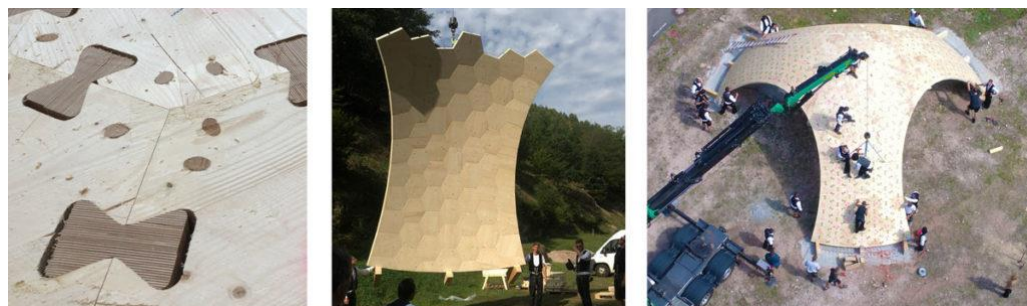
2.4. Плътна черупкова конструкция с двойна кривина, изпълнена със CLT панели

“Recycleshell” [6] представлява експериментален макет на гладка тънкостенна черупка с двойна кривина, реализирана със CLT панели. Пространствената структура показва няколко забележителни насоки:

- конструктивното решение на пространствената структура е надеждно и вероятно би могло да се приложи като алтернатива на метална или стоманобетонна черупкова конструкция при сгради или съоръжения с големи подпорни разстояния;
- възможно е изграждането на конструкция на гладка черупка с двойна кривина от строителния продукт от слепена дървесина – CLT панел;
- интериорното пространство, създадено от структурата, е впечатляващо, демонстрирана е и възможността за покриване на обема с покривно озеленяване;
- използването на съвременните технологии при проектиране (BIM технологията) и заводското производство на конструкцията (с машини с цифрово програмирано управление – ЦПУ) правят възможни и технологични подобни реализации;
- връзката между елементите на конструкцията е реализирана чрез крепежни елементи от дървесина.

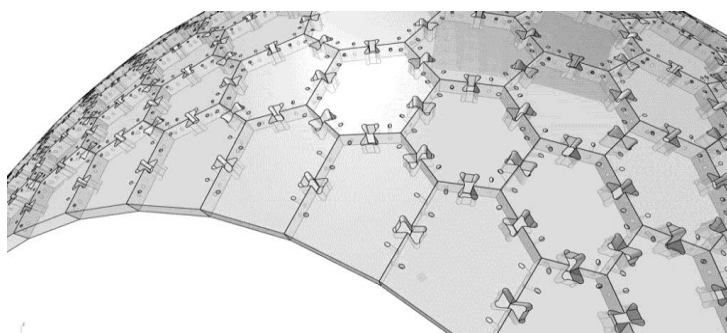
Таблица 2. Recycleshell, Кайзерслаутерн, Германия

Обект	Recycleshell, Кайзерслаутерн, Германия [6]
Година	Реализация – 2019 г.
Предназначение	Съоръжение от градската среда / Макет на конструкция от CLT
Размери	ЗП = 113 m ²
Тип конструкция	Тънкостенна черупкова конструкция с двойна кривина от равнинни елементи от слепени дъски (CLT панели)
Подпорно разстояние	12 m
Покритие	Покривно озеленяване



**Фиг. 4. Монтаж на “Recycleshell“, Университет Кайзерслаутерн, Германия [6].
Източник: www.architektur.uni-kl.de**

Приложението на дигиталните технологии при проектирането и заготовката способства за реализацията на тънкостенната черупкова конструкция от равнинни елементи от дървесина – CLT панели. Съвременният подход в проектирането – работа в BIM (строителен информационен модел) среда се допълва от заводската заготовка на елементите на конструкцията с ЦПУ (цифрово програмирано управление) машини.



Фиг. 5. Триизмерен модел на конструкцията на “Recycleshell“, Университет Кайзерслаутерн, Германия [6]. Източник: www.architektur.uni-kl.de

Конкретната реализация е предвидена като съоръжение от градската среда, но безспорно подобна форма и конструктивно решение могат успешно да се интегрират в обема на различни обществени, промишлени и складови сгради.



Фиг. 6. Демонстрация на реализацията “Recycleshell“, Университет Кайзерслаутерн, Германия [6].

Източник: www.architektur.uni-kl.de



Фиг. 7. Изпълнение на покривно тревно покритие “Recycleshell“, Университет Кайзерслаутерн, Германия [6].

Източник: www.architektur.uni-kl.de

Предвид експерименталния характер на проекта, водещо при формообразуването е постигането на оптимален конструктивен модел. Логично, резултатът е полусферична форма със симетрични овални отвори, осигуряващи оптимална работа на конструкцията [6]. Създаденият модел в максимална степен показва потенциала и възможността за приложение на CLT панели при черупковите конструкции. Подобна форма би могла да бъде изпълнена и от стоманобетон, но изпълнението ѝ би създавало редица технологични затруднения, а в допълнение естетическото въздействие на бетона отстъпва пред визията на дървесината.

Силно впечатление прави озеленения покрив, който в комбинация с дървесината допринася за хармоничната интеграция на архитектурното решение в околната среда.

2.5. Плътна черупкова конструкция с двойна кривина, изпълнена с пространствени модули от LVL плоскости

“HexBox Сапору” [7] представлява тънкостенна черупка с двойна кривина, реализирана с пространствени модули, изградени от LVL. Пространствената структура има експериментален характер и цели да демонстрира възможностите на конструктивното решение.

Таблица 3. HexBox Сапору, Сидни, Австралия

Обект	HexBox Сапору, Сидни, Австралия [7]
Година	Реализация – 2019 г.
Предназначение	Слънцезащитна конструкция / Макет на конструкция от LVL
Размери	Площ = 60 m ²
Тип конструкция	Черупкова конструкция с двойна кривина с модули – елементи от слепени дъски (CLT панели)
Подпорно разстояние	6 m
Покритие	ТРО мембрана

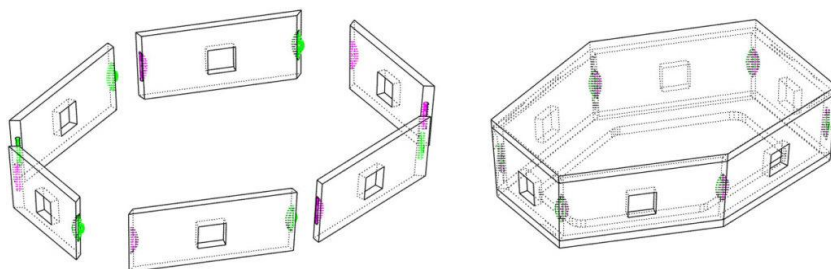
Реализацията представлява интерес поради тенденция, която представя изпълнение на сложна пространствена структура чрез предварително изготвени в заводски условия пространствени конструктивни елементи (модули). Подобна конструкция вероятно би могла да се реализира и в значително по-голям мащаб. Интерес представлява и икономичното решение за връзка между отделните модули – поява на трети елемент, отново от слепена дървесина.



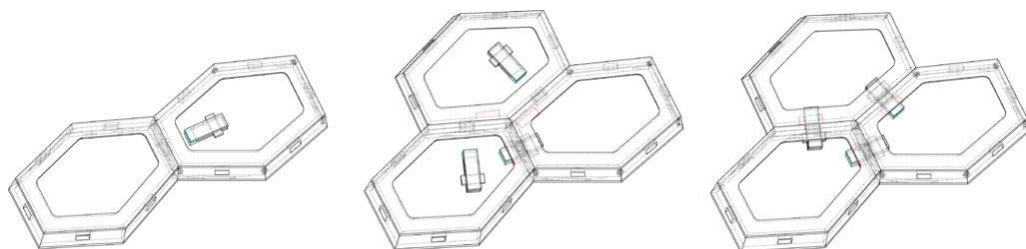
Фиг. 8. Слънцезащитна конструкция “HexBox Сапору“, Университет Кайзерслаутерн, Германия, снимка Катерин Лу [7]



Фиг. 9. Интериорен изглед на конструкцията на “HexBox Сапору“, Университет Кайзерслаутерн, Германия [7]. Източник: www.architektur.uni-kl.de



Фиг. 10. Изпълнение на пространствен модул от LVL плоскости за “HexBox Сапору“, Университет Кайзерслаутерн, Германия [7]. Източник: www.architektur.uni-kl.de



Фиг. 11. Сглобяване на пространствен модул за “HexBox Сапору“, Университет Кайзерслаутерн, Германия [7]. Източник: www.architektur.uni-kl.de

2.6. Черупкова конструкция с двойна кривина, изпълнена със CLT панели, укрепени чрез мрежа от линейни елементи от слепена дървесина (Glulam)

Зоопаркът в Цюрих, Швейцария е впечатляващ пример на тънкостенна черупка с двойна кривина, постигната с конструкция от елементи от слепена дървесина. Визията на архитектурната композиция е впечатляваща и показва в пълнота възможностите на черупковите конструкции от слепена дървесина – голямо подпорно разстояние (80 m), аморфна форма на черупката, запомняща се визия, впечатляващо решение за горно осветление и естествени материали.

Таблица 4. Зоопарк в Цюрих, Швейцария

Обект	Зоопарк, Цюрих, Швейцария [8]
Архитект	Markus Schietsch Architekten
Година	Реализация – 2014 г.
Предназначение	Закрит зоопарк за едри бозайници
Размери	РЗП = 8440 m ² , ЗП = 6000 m ²
Тип конструкция	Черупкова конструкция с двойна кривина
Подпорно разстояние	D = 80 m
Покритие	LVL панел, покривно осветление



Фиг. 12. Изглед на Зоопарка в Цюрих, Швейцария, Markus Schietsch Architekten [8].
Източник: www.archdaily.com

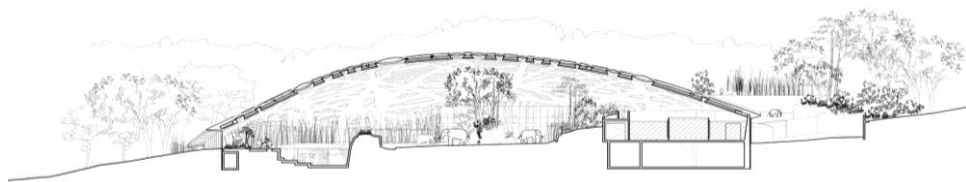
Черупковата конструкция в аморфна форма с двойна кривина е съставена от CLT панели и покрива около 6000 m² площ. Черупката достига до 18 m максимална височина, като по контура тя варира в разстоянието си до терена от 80 cm до 10 m [8].



**Фиг. 13. Схема план партер, Зоопарк в Цюрих, Швейцария, Markus Schietsch Architekten [8].
Източник: www.archdaily.com**

Концепцията на сградата произтича от естествения хабитат на едрите бозайници (слонове и др.), които ще приюти. Традиционно, черупковата конструкция е натоварена на натиск, който изтича по опорния стоманобетонен контур на сградата. Аморфната форма с многобройните ѝ характерни отвори (35% от площта ѝ са отвори), дава отражение и върху пренасянето на натисковите усилия от конструкцията – оформени са „лъчи“, по които тези усилия се пренасят (подобно на арки).

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° 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 × 32 cm, а навсякъде около отворите са монтирани греди от слепена дървесина със сечение 24 × 16 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 [8].



**Фиг. 14. Разрез, Зоопарк в Цюрих, Швейцария, Markus Schietsch Architekten [8].
Източник: www.archdaily.com**

В заключение, ако направим сравнение между подобно решение за аморфна черупкова конструкция, изпълнено от стоманобетон и това от дървесина, са явни предимствата на черупката от дървесина:

- естественият материал (дървото) остава видим в интериора и спомага за изграждане на една „натурална“ визия на пространството, докато стоманобе-

тонът би могъл да остане видим при монтаж на допълнителна обшивка, която би покачила строителните разходи;

- конструкцията от дървесина няма да корозира или да се компрометира от влажната среда в зоопарка;
- не е нужно да се изработва кофраж за изливане на сложната форма;
- по-лека конструкция;
- по-голяма точност при изпълнението.

От друга страна, изпълнението на подобна структура със стоманена конструкция би създавало редица проблеми:

- необходимост от защита от корозия;
- подобна форма, изпълнена от стоманени рамки/арки, поражда необходимост от изпълнение и на второстепенна конструкция между тях;
- ще е нужно да се изпълнят редица допълнителни вътрешни слоеве като послоен монтаж, за да се постигне сегашната визия на интериорното пространство.

2.7. Основни предимства на черупковите конструкции от слепена дървесина

Основните предимства на черупковите конструкции от слепена дървесина пред алтернативните конвенционални решения за такъв тип конструкции са:

- Естествен материал, лесен за добиване, обработка и снабдяване, което отговаря на съвременните тенденции за устойчива архитектурна среда.
- Тънкостенните черупкови конструкции позволяват конструкция без колони при голямо подпорно разстояние.
- Естетическото въздействие на дървесината.
- Вековните народни традиции в строителството с дървесина.
- Представените модели на конструкции са приложими при реализирането на сгради с различни функции – спортни зали, басейни, складови и производствени сгради и други.
- Висока енергоефективност.

Плътните черупки със CLT и LVL панели са съвременно решение, включващо използване на иновативен материал и прилагане на цифрови технологии при проектиране и изпълнение. Аналогия на това решение може да се търси в стоманобетонните черупки, но плътните черупки от CLT и LVL панели се налагат със следните предимства – естетиката на дървесината, избягване на изпълнението на сложен кофраж, избягване на мокри процеси, изключителна прецизност на изпълнението и улеснен монтаж.

3. Ротационни повърхности – купол от слепена дървесина

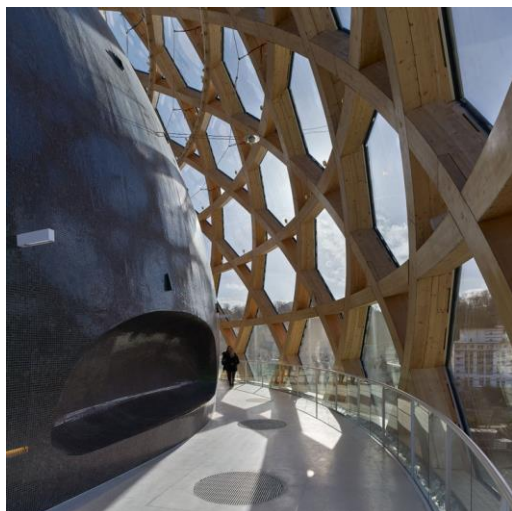
Куполите са една от ротационните форми, които могат да бъдат реализирани с пространствена (черупкова) конструкция от слепена дървесина. В практиката има две

принципно различни конструктивни решения на тази форма – геодезичен купол и купол с кръжила. Куполите с кръжила са по-трудни за изпълнение поради необходимостта от огъване на кръжилата (ребрата) им. Решение, срещано в практиката, е кръжилата да бъдат изпълнени като ферми с извит горен пояс.

Куполите с мрежеста структура са по-популярни поради по-лесното изпълнение на двойно извитите повърхности. В проекта за концертна зала на Шигеру Бан Архитекти, залата е „обвита“ именно от подобна структура от слепена дървесина.

Таблица 5. Концертна зала в Париж, Франция

Обект	Концертна зала Булон Биянкур, Париж, Франция [9]
Архитект	Shigeru Ban Architects
Година	Реализация – 2017 г.
Предназначение	Концертна зала
Размери	РЗП = 36500 m ²
Тип конструкция	Купол
Подпорно разстояние	Дървената констр. на купола се простира на 70 m надлъжна ос, 45 m по напречна ос и 27,5 m височина
Покритие	Стъклена окачена фасада



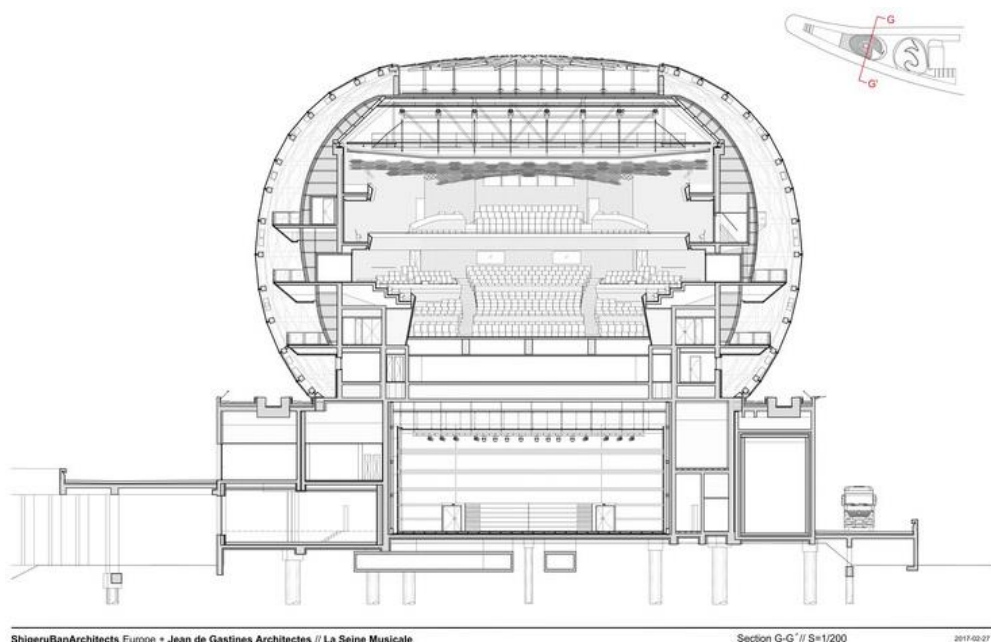
Фиг. 15. Интериор на кулоари, Концертна зала Булон Биянкур, Париж, Франция / Shigeru Ban Architects [9].

Източник: www.archdaily.com



Фиг. 16. Изглед към Концертна зала Булон Биянкур, Париж, Франция / Shigeru Ban Architects [9].

Източник: www.archdaily.com



Фиг. 17. Разрез през концертна зала Булон Бьянкюр, Париж, Франция / Shigeru Ban Architects [9]. Източник: www.archdaily.com

4. Висящи черупки от слепена дървесина

Висящите черупки съдържат четири основни конструктивни елемента – носеща еднопоясна мрежа с въжета в едно или две направления, стабилизираща черупка, опорен контур, лежащ в повърхнината на черупката, и колони, носещи опорния контурен пръстен.

Таблица 6. Плувен басейн, Bad Dürrheim, Германия

Обект	Плувен басейн, Bad Dürrheim, Германия [10]
Архитект	Geier & Geier, Stuttgart
Година	Реализация – 1987 г.
Предназначение	Спортно съоръжение / плувен басейн
Размери	РЗП = 2500 m ²
Тип конструкция	Висяща черупкова конструкция
Подпорно разстояние	20 m
Покритие	Хидроизолационна ПВЦ мембрана

Висящата черупкова конструкция е формирана от извити греди от слепена дървесина. Гредите са захванати за пет основни носещи колони от слепена дървесина, с пространствена форма („дървообразна“). Колоните са стъпили на стоманобетонна конструкция. Височината на колоните е между 9,1 m и 11,5 m. Контурът на висящата конструкция е оброчен от арки от дървесина.

Ребрата са от слепена дървесина с двойна кривина, а сечението им е $200\text{ mm} \times 205\text{ mm}$. Напречните греди са с размери $80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ или $120\text{ mm} \times 140\text{ mm}$, разположени на 800 mm осово.



Фиг. 18. Интериорен изглед на плувен басейн в Бад Дурхаим, Германия / Geier & Geier, Stuttgart [10]. Източник: www.burgbacher.de



Фиг. 19. Изглед към сградата на басейна, Бад Дурхаим, Германия / Geier & Geier, Stuttgart [10]. Източник: www.burgbacher.de

5. Анализ на разгледаните примери на реализирани черупкови конструкции от дървесина

Анализът е представен в табличен вид, като са изведени няколко основни характеристики, спрямо които са разгледани черупковите конструкции от дървесина. Взети са предвид подпорното разстояние, типът конструктивно решение, конструктивната структура, конструктивните елементи и материалът им.

Таблица 7. Разгледани примери на сгради, реализирани с черупкови конструкции от дървесина

Обект	Подпорно разстояние	Конструкция	Констр. структура	Констр. елемент/ материал
Закрит плувен басейн, Bad Orb, Германия	42 m	Мрежеста черупкова констр. с двойна кривина	Мрежеста – от Glulam греди	Glulam греди
Recycleshell, Кайзерслаутерн, Германия	12 m	Плътна черупкова констр. с двойна кривина	Плътна – от CLT панели	CLT панели
HexBox Сапору, Сидни, Австралия	6 m	Плътна черупкова констр. с двойна кривина	Плътна – от пространствени модули от LVL плоскости	LVL плоскости
Зоопарк, Цюрих, Швейцария	80 m	Аморфна черупкова констр. с двойна кривина	Мрежеста от Glulam греди, + Плътна CLT панели	CLT панели + Glulam греди за аморфна черупкова конструкция
Концертна зала, Париж, Франция	45 m по напречна ос	Мрежест купол	Мрежеста – от Glulam греди	Glulam греди
Плувен басейн, Bad Dürgheim, Германия	20 m	Висяща черупкова конструкция	Мрежеста – от извити Glulam греди	Извити Glulam греди

От анализираните примери на архитектурни реализации на сгради и съоръжения, решени с черупкова конструкция, могат да бъдат изведени следните заключения и насоки:

- Черупковите конструкции от слепена дървесина биха могли да намерят много по-широко приложение при реализирането на различни типове сгради и съоръжения.
- Черупковите конструкции от слепена дървесина са рационално решение за покривана и ограждаща конструкция при сгради и съоръжения с големи подпорни разстояния без допълнително подпиране.
- Черупковите конструкции от слепена дървесина отговарят на всички естетически, функционални, икономически и технологични изисквания.
- Този тип конструкции съчетава най-съвременните подходи, както в проектирането, така и в производството в заводски условия.

- Линейните конструктивни елементи от слепена дървесина са Glulam и високоякостни греди и колони от LVL. Повърхнинните елементи са LVL и CLT. Този тип конструкции могат да се прилагат при подпорно разстояние до над 100 m.
- Използването на съвременните технологии при проектиране (BIM технологията) и заводското производството на конструкцията (с машини с цифрово програмирано управление – ЦПУ), правят възможни и технологични подобни реализации.
- Черупковата конструкция от слепена дървесина би могла да остане видима в интериорното пространство, без необходимост от допълнително обшиване.
- Конструктивната структура на черупковите конструкции от слепена дървесина би могла да бъде плътна (гладка), мрежеста, комбинирана (плътна + мрежеста) и ребреста (при ротационни форми).
- Разнообразие при формообразуването – тенденция за изграждане на по-сложни, аморфни форми.
- Прилагането на черупкови конструкции от дървесина са предпоставка за „устойчиво развитие на отделните архитектурни технологии и технически инсталации на базата и оценката на цялостния жизнен цикъл на архитектурния обект относно общото му въздействие едновременно върху околната среда и социалния живот“ [11].

Конструкцията от слепена дървесина намират приложение и имат предимства в следните типове сгради:

- обществени сгради;
- промишлени и складови – при производства в условия на „агресивна среда“ в строителството;
- при складови сгради за съхранение на соли, биологични продукти и др.;
- сгради и съоръжения за спорт и рекреация – плувни басейни – при условия на „агресивна среда“, мултифункционални зали, стадиони, зали за зимни спортове, покрити тенис кортове, зали за водни спортове, зали за лека атлетика, колоездене и др.;
- съоръжения от градската среда.

Сградите, проектирани и построени през последните десетилетия, демонстрират ново качествено ниво в използването на иновативни строителни технологии и нетрадиционно прилагане на сградните материали [12]. Развитие на науката и индустриалните технологии е довело до създаване на съвременни строителни продукти и системи, както и до дигитализиране на проектирането и строителството. Като резултат, съвременното строителството с дървесина е бързо и високотехнологично, а черупковите конструкции от слепена дървесина предлагат надеждно решение за широк диапазон от архитектурни форми, в това число и обеми с параметричен дизайн. Сгради с особено големи конструктивни предизвикателства предопределят вида на конструкцията като доминираща в пространството и даваща цялостния облик на сградата [13].

Революционното технологично развитие в последните десетилетия очертава все по-ясно облика на сградите на бъдещето [14]. Черупковите конструкции от слепена дър-

веса са естетически издържано, иновативно и надеждно решение за големи подпорни разстояния, което хармонично би се вписало в обемно-пространственото решение на сградата (залата) на бъдещето.

6. Заключение

Реализациите на съвременни черупкови конструкции от слепена дървесина демонстрират потенциала им в няколко насоки – архитектурна, конструктивна, структурна и други. В архитектурен аспект тези черупкови конструкции демонстрират възможностите за изграждане на повърхности със свободна форма без междинно подпиране, впечатляващата визия на дървесината, добрите топлотехнически показатели на материала и други. В конструктивен аспект, потенциалът се изразява в подобрената носимоспособност на материалите, новите технологични възможности за прецизно изготвяне на пространствените възлови съединения и други. Основните трудности пред реализирането на сгради и съоръжения с черупкови конструкции от слепена дървесина остават проектирането и липсата на унифицирани технологични решения в строително-монтажен аспект. Но съвременните технологии предлагат отговори и в тази насока – проектиране в BIM среда и предварителна заводска заготовка на конструктивните елементи чрез ЦПУ машини.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. da Vinci Pilot Project, Handbook 1 – Timber structures, 2008.
2. *Popov, At.* Arhitekturni konstruktsii, DI Tehnika, 1972, четврто преработено и допълнено издание.
3. *Angelov, M.* Arhitekturni konstruktsii 2 chast, Izdatelstvo Tehnika, 1996.
4. *Koseva, D.* Compositional Diversity of Tensile Structures Made of a Mechanically Prestressed Textile Membrane, phd 2021, page 200.
5. Toskana therme / Ollertz Architekten BDA. Hess Timber Limitless. <http://hess-timber.com/en/references/detail/toskana-therme/>, accessed 15.12.2018.
6. *Robeller, Chr.* Recycleshell. DTC, TU Kaiserslautern, November 2019, <http://www.architektur.uni-kl.de/dtc/2019/09/05/recycleshell/>, accessed 15.04.2020.
7. *Robelle, Chr.* HexBox Canopy. DTC, TU Kaiserslautern, October 2019, <http://www.architektur.uni-kl.de/dtc/2019/08/17/hexbox-canopy-sydney/>, accessed 15.04.2020.
8. Elephant House Zoo Zurich / Markus Schietsch architecten. // ArchDaily, 10 July 2015, <http://archdaily.com/770772/elephant-house-zoo-zurich-markus-schietsch-architekten>, ISSN 0719-8884, accessed 15.12.2018.
9. La Seine Musicale / Shigeru Ban Architects. // ArchDaily, 28 June 2017, <https://www.archdaily.com/874535/la-seine-musicale-shigeru-ban-architects>, ISSN 0719-8884, accessed 16.04.2020.
10. Solemar in Bad Dürkheim, <http://www.burgbacher.de>, accessed 16.08.2018.

11. *Maznikov, A.* Report / article Architectural Sustainable Design of Building Service Systems as Part of Industrial Buildings and Factories – VIII International Scientific Conference for Architecture and Construction organized by the Varna Free University “Chernorizets Hrabar”, Varna, published in the edition “Arhitektura and stroitelstvo” – Proceedings, VSU 2017, ISSN 2335-0781, pp. 190-198.

12. *Kutova, G.* The building envelope of the 21st century. Second revised and supplemented edition, Propeller Publishing House, Sofia, 2020, ISBN 978-954-392-604-6.

13. *Daskalova-Ivanova, Tzv.* The messages of structure, monography. Propeller publishing house. 2021, ISBN 978-954-392-664-0.

14. *Kutova, G.* The building of the future – smart and alive! XX International Scientific Conference of Construction and Architecture VSU'2020: 113-120.

CONTEMPORARY WOODEN SHELL STRUCTURES

M. Arnaudov¹

Keywords: *timber shells, timber barrel vaults, lattice domes, contemporary wooden structures*

ABSTRACT

In the past, the design and construction of a wooden shell structure was a major challenge. However, the digital age has created entirely new possibilities and materials that optimize the costs and time in the design, manufacture and installation of these efficient and elegant structures. There are also new technological possibilities for the precise execution of spatial nodes.

The contemporary wooden shell structures are analyzed as a possible rational solution for wide span. Their characteristics and advantages are systematized. Examples from Europe and around the world are taken into consideration and they have been selected in accordance with the specifics of their constructive solution and the tendencies they set for the construction of such modern structures.

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