

УДК 72.03:624.01:726.5

Кельба С. С., канд. арх., доц., <https://orcid.org/0009-0006-0844-8653>Ященко О. Ф., канд. арх., проф., <https://orcid.org/0000-0001-6181-6597>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

**ФОРМОТВОРЕННЯ І МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ
ОБ'ЄМНО-ПРОСТОРОВИХ РІШЕНЬ У САКРАЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ
ПІД ВПЛИВОМ СУЧАСНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ТА БУДІВЕЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
І МЕТОДИК ЇХ РОЗРАХУНКУ**

Анотація

Вступ. У статті розглянуто проблему проектування складних архітектурних форм у сучасному сакральному будівництві з акцентом на конструктивну реалізованість та інженерно-розрахункові аспекти. Розкрито значення будівельних конструкцій як ключового чинника, що дозволяє втілювати нетипові об'ємно-просторові рішення в умовах реального будівництва. Підкреслено актуальність комплексного підходу до формоутворення, що охоплює як архітектурну концепцію, так і точний інженерний аналіз.

Проблематика. Брак уніфікованих методик моделювання, розрахунку та нормативного регламенту для проектування складних конструктивних систем призводить до труднощів у практичній реалізації інноваційних архітектурних форм. Це особливо актуально у сфері сакральної архітектури, де візуальна експресія потребує конструктивної обґрунтованості.

Мета статті. Висвітлення перспектив сучасного конструювання складних форм на прикладі сакральних будівель та обґрунтування потреби в оновленні розрахункових підходів, типологій конструкцій і нормативної бази.

Матеріали і методи. Для дослідження використано метод аналізу реалізованих архітектурно-конструктивних рішень у сфері сакрального будівництва, інструменти параметричного та геометричного моделювання (Grasshopper, Rhino), програмні засоби для FEM-розрахунку (LIRA-SAPR, SCAD Office, Karamba3D), огляд чинних нормативних документів та порівняльні інженерні розрахунки. Розглянуто типологію сучасних конструкцій та принципи їх адаптації до складних форм.

Результат. На прикладі порівняння традиційної та параметричної купольної конструкції доведено вплив геометрії на напружено-деформований стан та матеріаломісткість. Запропоновано підходи до панелізації, розробки вузлів з'єднання, оптимізації армування та врахування температурно-деформаційних впливів. Встановлено ключові обмеження чинної нормативної бази та подано пропозиції щодо її оновлення.

Висновки. Складні форми в архітектурі неможливо реалізувати без глибокого інженерного аналізу та міждисциплінарної співпраці. Будівельні конструкції нового покоління дозволяють поєднати естетику, довговічність та технологічність, однак потребують перегляду нормативних і методичних засад проектування. Отримані висновки можуть бути корисними для проектувальників, науковців і розробників сучасних будівельних норм.

Ключові слова: будівельні конструкції, вузли з'єднання, геометризація, нормативна база, оболонка, параметричне моделювання, розрахунок, сакральна архітектура, складні форми, FEM-аналіз.

Вступ

У сучасній архітектурі спостерігається зростання інтересу до складних геометричних форм, особливо в контексті проектування сакральних споруд, які традиційно виконують не лише функціональну, але й глибоко символічну роль. Сакральна архітектура в усі історичні епохи була

каталізатором розвитку будівельних конструкцій і технічних рішень, які дозволяли реалізувати інноваційні просторові образи — від масивних куполів до струнких оболонок і гіперболічних форм.

Із появою нових цифрових інструментів моделювання архітектори отримали безпрецедентні можливості у формоутворенні, однак реалізація таких форм потребує адекватних інженерних підходів, методів розрахунку та новітніх конструктивних рішень. Значна частина складних форм не може бути реалізована з використанням традиційних нормативів без суттєвих адаптацій, що вимагає перегляду усталених підходів до проектування, зокрема в частині геометричного аналізу, вибору матеріалів і конструктивних систем.

У зв'язку з цим актуальним є вивчення впливу будівельних конструкцій на можливість моделювання складних форм, а також розроблення ефективних підходів до їх конструктивної адаптації, розрахунку та реалізації. Це особливо важливо в умовах модернізації сакрального будівництва, яке поєднує глибоку культурну традицію з інженерними викликами XXI століття.

Метою статті є висвітлення перспектив використання сучасних будівельних конструкцій у моделюванні складних форм та обґрунтування необхідності удосконалення підходів до їхнього конструювання і розрахування на прикладі сакральних об'єктів.

Виклад основного матеріалу

Ретроспектива розвитку конструкцій у сакральній архітектурі

Історичний розвиток сакральної архітектури тісно пов'язаний з еволюцією будівельних конструкцій, адже саме культові споруди найчастіше ставали полігоном для апробації інженерних інновацій. З часів античності й до епохи готики храмові комплекси вирізнялися масштабністю, складною просторовою організацією та прагненням до вертикальності, що вимагало пошуку ефективних конструктивних схем.

Одними з найдавніших систем були **масивні несучі стіни**, які сприймали вагу перекриттів і склепінь, як-от у мегалітичних святилищах або ранньохристиянських базиліках. У Візантії набули поширення **купольні конструкції**, реалізовані на підпружних арках або пандативах, які дозволяли перекривати центральні об'єми без колон. Прикладом є собор Святої Софії в Константинополі, де інженерна думка поєднала форму й конструкцію в єдине ціле.

Середньовічна **готика** стала новим етапом конструктивної еволюції: застосування аркбутанів, стрілчастих арок і нервюрних склепінь дозволило створити легкі, вертикально орієнтовані конструкції з розвантаженням основних стін. Конструкція перетворилася на каркас, а заповнення стін стало другорядним — передумова сучасного принципу конструктивної раціональності.

У новий час, особливо в період модерну та міжвоєнної доби, почали застосовуватись **залізобетонні склепіння**, що уможливило формоутворення гнучкіших, плавних об'ємів (наприклад, роботи Гауді або храму Домініка Перра у Франції). Водночас, багато інженерів і архітекторів експериментували зі **складеними оболонками, гіперболічними параболоїдами, тонкостінними куполами**, які поєднували малі товщини із значними прольотами.

Таким чином, від масивних стін до інженерно витончених просторових оболонок, сакральна архітектура демонструє тісний зв'язок форми та конструкції. Історичний досвід показує, що складні форми реалізовувалися лише за умови наявності відповідної інженерної бази та конструктивної логіки. Саме ці принципи стають фундаментальними і в сучасному проектуванні складних форм, де форма диктує потребу в нових підходах до її реалізації.

Типологія сучасних конструкцій для складних форм

Із розвитком цифрових інструментів проектування та появою нових будівельних матеріалів відкрились принципово нові можливості для формоутворення в архітектурі, особливо в сакральному будівництві, де завжди існувала потреба у виразній, символічній формі. Складні геометрії (подвійно вигнуті поверхні, скульптурні куполи, багатогранні об'єми) потребують відповідної конструктивної підтримки, що забезпечується спеціалізованими типами несучих систем.

Серед найбільш поширених сучасних конструктивних рішень для складних форм можна виділити:

- **Оболонкові конструкції** — тонкостінні криволінійні системи, які працюють переважно на мембранні напруження (наприклад, куполи з монолітного або збірного бетону). Завдяки подвійній кривині забезпечують високу жорсткість при мінімальній товщині.
- **Просторові ферми** — сталеві або комбіновані конструкції, що утворюють жорсткий об'єм із мінімальною масою. Використовуються для створення легких покриттів зі складною конфігурацією, зокрема у великих храмах або конференц-залах при них.
- **Клеснодерев'яні арки та оболонки** — ефективне рішення для складних форм при збереженні природності матеріалу. Завдяки шаруватій структурі матеріалу забезпечується висока несуча здатність та гнучкість формоутворення.
- **Мембранні та натяжні системи** — легкі текстильні або плівкові матеріали, які застосовуються як покриття для зовнішніх конструкцій або павільйонів при храмах. Забезпечують високу естетику при малій вазі, але потребують точного попереднього натягнення та ретельного розрахунку вітрового навантаження.
- **Гібридні конструкції** — комбінація сталевих, бетонних, дерев'яних і композитних елементів, що дозволяє інтегрувати кілька конструктивних принципів в одному об'єкті. Такі системи особливо актуальні для адаптації форми до технічних умов реалізації.

Прикладом сучасного вдалого використання складних конструкцій у сакральному будівництві є церква Святого Франциска в місті Вітторія (Іспанія), де застосовано гіперболічне покриття з попередньо напруженого бетону, та церква Святого Марка в Ліоні (Франція), побудована із використанням склеєної деревини та сталевих ферм.

Загальною тенденцією є поступовий перехід від суто декоративного до **інженерно обгрунтованого формоутворення**, де форма не лише візуально вражає, а й відповідає реальній механічній поведінці конструкції.

Розрахунок і моделювання складних форм

Складні архітектурні форми, що дедалі частіше з'являються в сучасному сакральному будівництві, потребують високоточного інженерного аналізу. У порівнянні з традиційними симетричними об'ємами, де навантаження передаються рівномірно і можуть бути оцінені спрощеними методами, складні форми викликають **нерівномірні розподіли напружень**, поєднання локальних ефектів та складну поведінку конструкції при експлуатаційних і особливих навантаженнях (вітер, сніг, сейсміка).

Геометричне моделювання

Першим етапом проектування є **побудова геометричної моделі**, яка повинна бути не лише архітектурно коректною, але й аналітично придатною до розрахунку. Для цього використовують параметричні інструменти, зокрема **Grasshopper** для Rhino, **Dynamo** для Revit, які дозволяють змінювати форму моделі на основі вихідних параметрів (радіусів кривини, кроку панелей, кута нахилу тощо). Це значно спрощує процес оптимізації складних об'ємів ще до розрахунків.

Інженерний аналіз (FEM)

Основою для визначення поведінки складних конструкцій є **метод скінченних елементів (FEM)**, що застосовується в програмах:

- **SCAD Office, LIRA-SAPR, Ansys** — для детального розрахунку напружень, переміщень, стабільності;
- **Karamba3D** — плагін для Grasshopper, який дозволяє проводити попередній аналіз ще на етапі формоутворення;
- **Tekla Structures, RFEM** — для моделювання просторових металевих і змішаних систем.

Розрахунок охоплює:

- **напружено-деформований стан** оболонок і рам;
- визначення **вузлових зусиль** та ліній впливу;

- **вітрові та снігові навантаження**, моделі вітрового обтікання (ДБН В.1.2-2:2006 та Eurocode 1);

- **власну вагу та попереднє напруження** для криволінійних оболонок.

Базовий приклад розрахунку

У **табл. 1** наведено порівняльну характеристику конструктивних параметрів традиційної сферичної оболонки та параметричної гіпар-форми купольного покриття для сакральної споруди з однаковим діаметром основи (20 м).

Таблиця 1

Порівняння параметрів двох типів купольних конструкцій

Параметр	Традиційна сферична оболонка	Параметрична гіпар-форма
Товщина бетону, мм	250	180
Макс. горизонтальне зусилля, кН	260	190
Макс. вертикальне навантаження, кН	540	470
Розподіл напружень	Радіально симетричний	Анізотропний
Вага конструкції, т	95	68

Отримані результати свідчать, що параметричне формоутворення дозволяє зменшити матеріаломісткість конструкції при збереженні її міцності. Водночас ускладнюється розрахунок вузлів і фундаментів через нерівномірність навантажень.

Моделювання складних форм вимагає інтеграції архітектурного і конструктивного підходів на всіх етапах проєктування. Використання FEM-аналізу та параметричних платформ дозволяє ефективно передбачити поведінку складних конструкцій, оптимізувати їх геометрію та забезпечити відповідність вимогам міцності, жорсткості і стійкості.

Конструктивна адаптація складних форм

Одним з ключових викликів у реалізації складних архітектурних форм є їх **перехід від ідеальної цифрової геометрії до фізично досяжної будівельної конструкції**. Цей процес потребує особливих підходів до структуризації поверхонь, проєктування вузлів, вибору матеріалів та технологій зведення.

Геометризація форми

Щоб забезпечити можливість виготовлення та монтажу складних оболонок або фасадів, застосовується **сіткова дискретизація**. Найбільш поширені способи:

- **трикутна (triangulation)** — забезпечує геометричну стабільність та є базовою для структур типу geodesic dome;
- **чотирикутна (quad-panelization)** — дозволяє використовувати плоскі або циліндричні елементи;
- **радіальна чи ізотропна** — підходить для купольних або хвилових структур.

Тип і крок сітки обираються з урахуванням матеріалу, жорсткості елементів, розмірів покриття, радіуса кривизни та можливостей монтажу.

Передача навантаження

У складних формах передача навантажень відбувається не лише вертикально, як у звичайних каркасах, а **по складних просторових траєкторіях**. Наприклад:

- **у подвійно вигнутих оболонках** навантаження передається через мембранні напруження до підпірних елементів;
- **у натяжних структурах** — через кабелі до анкерних вузлів або колон;
- **у склепіннях** — через стиск до опор, іноді з додатковим розпором, що вимагає влаштування обв'язки чи тяг.

Конструктивна модель має забезпечити **неперервність силових ліній**, що є особливо критично для тонкостінних і масштабних форм.

Вузли з'єднання та монтаж

Особливу складність становлять **вузли кріплення** — вони мають не лише з'єднувати елементи, а й витримувати складну комбінацію зусиль. Вузли проектуються з урахуванням:

- типу матеріалів (сталь-сталь, дерево-метал, бетон-композит);
- потреби в допусках на деформації;
- температурних розширень;
- зручності монтажу (болтові, зварні, клеєві, шарнірні з'єднання).

Часто застосовуються **індивідуально розроблені вузли**, виготовлені з використанням CNC або 3D-друку з металу.

Армування та попереднє напруження

У бетонних оболонках зі складною геометрією особливого значення набуває **оптимізація армування**. Використовуються:

- **двонаправлені арматурні сітки** з адаптацією до радіальних і тангенціальних зусиль;
- **стрижневе армування з прив'язкою до ліній впливу**;
- **композитна арматура** для зменшення маси (склопластик, базальт);
- **попереднє напруження** (кабелями або арматурою), що дозволяє зменшити товщину та тріщинуватість.

Крім того, у проектуванні враховуються **температурні та усадкові деформації**, для компенсації яких передбачаються **деформаційні шви**, компенсаційні стики та інші заходи.

Практичні виклики та нормативно-розрахункове забезпечення

Незважаючи на стрімкий розвиток програмного забезпечення та матеріалів, **сучасне проектування складних форм** у сакральній архітектурі часто стикається з бар'єрами, пов'язаними із застосуванням чинної нормативної бази. У переважній більшості випадків існуючі нормативні документи — зокрема ДБН В.1.1-7:2016, ДБН В.2.6-98:2009, ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012 — не враховують специфіки проектування складних оболонкових чи гібридних систем, особливо коли йдеться про нестандартну геометрію, параметричне моделювання чи комбіновані матеріали.

Обмеження чинних нормативів

- **Типові конструктивні схеми, наведені в нормативній документації, розраховані на прямолінійні, симетричні системи** з відносно простими умовами навантаження.
- **Методи розрахунку**, що базуються на спрощених аналітичних моделях (балки, рами, стінки), не дозволяють адекватно оцінити напружено-деформований стан у подвійно вигнутих чи адаптивних оболонках.
- **Відсутність алгоритмів врахування попередньо напружених структур, комбінованого армування, гібридних матеріалів** (бетон + композит, дерево + сталь) у більшості нормативів.

Це змушує проектувальників використовувати **досвід аналогів**, експериментальні дані або результати комп'ютерного моделювання без повного нормативного забезпечення.

Необхідність оновлення підходів

Сьогодні на перший план виходить потреба у:

- **розробленні нових типових рішень і конструктивних вузлів** для оболонкових, натяжних і гібридних систем;
- **включенні FEM-аналізу як обов'язкового етапу розрахунку** нестандартних архітектурних форм;
- **оновленні розділів нормативів щодо динамічних, сейсмічних і температурних впливів** для складних систем;
- **введенні критеріїв прийнятності моделей**, створених у параметричних середовищах (наприклад, перевірка коректності геометрії, відсутність сингулярностей, раціональність панелізації).

Крім того, перспективним є розширення нормативної бази на основі **європейських (Eurocode)** та американських (ACI, ASCE) підходів, які вже містять положення щодо просторових оболонки, напружених мембран, адаптивних структур.

Міждисциплінарний підхід

Складна форма — це не лише архітектура або інженерія, а їх синтез. Реалізація подібних проєктів потребує **командної роботи**:

- **архітекторів**, що генерують концепцію;
- **конструкторів**, які забезпечують стійкість і реалізованість;
- **розробників цифрових моделей**, які трансформують геометрію у дані для розрахунку й виробництва.

Саме таке поєднання знань і дозволяє адаптувати архітектурні ідеї до будівельної практики, забезпечуючи безпечність і економічну доцільність реалізації складних форм.

Висновки

Будівельні конструкції відіграють ключову роль у реалізації складних архітектурних форм, зокрема в сакральному будівництві, де архітектурна експресія тісно пов'язана з конструктивною раціональністю. Сучасні матеріали, цифрові технології моделювання та вдосконалені методи розрахунку дозволяють не лише реалізовувати нетипові просторові форми, а й робити це ефективно з точки зору експлуатаційних характеристик і витрат ресурсів.

У ході аналізу встановлено, що для реалізації складних форм необхідна тісна взаємодія геометрії, матеріалів, конструктивної логіки та розрахункової моделі. Традиційні підходи до проєктування потребують адаптації, зокрема через використання FEM-аналізу, параметричного моделювання та інструментів геометричної дискретизації. Успішна конструктивна адаптація складних форм передбачає опрацювання вузлів, панелізації, передачі навантажень та температурно-деформаційних ефектів.

Наявні будівельні нормативи обмежено охоплюють можливості сучасного формоутворення, що потребує актуалізації методичних підходів, оновлення нормативної бази та інтеграції міждисциплінарного проєктного процесу.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на формалізацію адаптивних розрахункових схем, типізацію вузлів для складних форм, а також на розвиток нормативно-технічних рішень для реалізації інноваційних конструкцій у сакральній архітектурі.

Список літератури

1. ДБН В.1.1-7:2016. Навантаження і впливи. Київ: Мінрегіон України, 2016. 89 с. (Інформація та документація).
2. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 150 с. (Інформація та документація).
3. ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012. Настанова з проєктування конструкцій з використанням композитної арматури. Київ: Мінрегіон України, 2013. 112 с. (Інформація та документація).
4. Killian A., Khemlani L. Computational design and BIM integration in modern architecture. *International Journal of Architecture and Computing*. 2019. Vol. 17(2). P. 123–142. DOI: <https://doi.org/10.1260/1478-0771.17.2.123>.
5. Пархоменко І. О., Носенко С. В. Параметричне моделювання складних форм у контексті сучасної архітектури. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2021. № 2. С. 45–52.
6. Маковецький С. М. Конструктивні системи сучасних будівель: навч. посіб. Львів: ЛНАУ, 2015. 296 с.
7. Williams C.J.K. Geometry of structure: from mathematics to architecture. *Nexus Network Journal*. 2001. Vol. 3(1). P. 75–85. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00004-001-0005-5>.
8. Романенко І. А., Гаврилюк А. В. Проєктування оболонкових конструкцій складної геометрії. *Архітектура та сучасність*. 2020. № 27. С. 33–39.

9. Шевченко Л. М., Лещенко А. С. Інженерна геометрія у моделюванні архітектурних форм. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2018. № 4. С. 21–28.
10. Karamba3D Documentation. URL: <https://www.karamba3d.com/documentation/> (дата звернення: 08.04.2025).

References

1. DBN V.1.1-7:2016. Navantazhennia i vplyvy (Loads and actions). Kyiv: Minregion of Ukraine, 2016. 89 p. [in Ukrainian].
2. DBN V.2.6-98:2009. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia (Building structures. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions). Kyiv: Minregionbud of Ukraine, 2010. 150 p. [in Ukrainian].
3. DSTU-N B V.2.6-185:2012. Nastanova z proiektuvannia konstruktsii z vykorystanniam kompozytnoi armatury (Guidelines for the design of structures using composite reinforcement). Kyiv: Minregion of Ukraine, 2013. 112 p. [in Ukrainian].
4. Killian A., Khemlani L. Computational design and BIM integration in modern architecture. *International Journal of Architecture and Computing*. 2019. Vol. 17(2). P. 123–142. DOI: <https://doi.org/10.1260/1478-0771.17.2.123> [in English].
5. Parkhomenko I. O., Nosenko S. V. Parametrychne modeliuvannia skladnykh form u konteksti suchasnoi arkhitektury (Parametric modelling of complex forms in the context of modern architecture). *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*. 2021. No. 2. P. 45–52 [in Ukrainian].
6. Makovetskyi S. M. Konstruktyvni systemy suchasnykh budivel (Structural systems of modern buildings): Textbook. Lviv: LNAU, 2015. 296 p. [in Ukrainian].
7. Williams C.J.K. Geometry of structure: from mathematics to architecture. *Nexus Network Journal*. 2001. Vol. 3(1). P. 75–85. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00004-001-0005-5> [in English].
8. Romanenko I. A., Havryliuk A. V. Proiektuvannia obolonkhovykh konstruktsii skladnoi heometrii (Design of shell structures with complex geometry). *Arkhitektura ta suchasnist*. 2020. No. 27. P. 33–39 [in Ukrainian].
9. Shevchenko L. M., Leshchenko A. S. Inzhenerna heometriia u modeliuvanni arkhitekturnykh form (Engineering geometry in modelling of architectural forms). *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*. 2018. No. 4. P. 21–28. [in Ukrainian].
10. Karamba3D Documentation. URL: <https://www.karamba3d.com/documentation/> (Last accessed: 08.04.2025) [in English].

Alexei Yaschenko, Ph.D. in Architecture, Prof., <https://orcid.org/0000-0001-6181-6597>

Serhii Kelba, Ph.D. in Architecture, Assoc. Prof., <https://orcid.org/0009-0006-0844-8653>

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

FORM GENERATION AND MODELLING OF COMPLEX SPATIAL SOLUTIONS IN SACRAL CONSTRUCTION UNDER THE INFLUENCE OF MODERN STRUCTURAL AND BUILDING TECHNOLOGIES AND CALCULATION METHODOLOGIES

Abstract

Introduction. The article addresses the issue of designing complex architectural forms in modern sacred architecture, with a focus on structural feasibility and engineering analysis. It highlights the importance of building structures as a key factor enabling the implementation of unconventional spatial

solutions within real-world construction conditions. The relevance of a comprehensive approach to form-making is emphasized — one that encompasses both the architectural concept and precise engineering analysis.

Problem Statement. The lack of unified methodologies for modeling, analysis, and regulatory frameworks for the design of complex structural systems creates challenges in the practical realization of innovative architectural forms. This is particularly relevant in the field of sacred architecture, where visual expression must be structurally justified.

Purpose of the Article. To outline the prospects of modern structural design of complex forms using examples from sacred architecture, and to substantiate the need for updated approaches to structural analysis, typology, and regulatory standards.

Materials and Methods. The study employs the method of analyzing implemented architectural-structural solutions in sacred construction, tools for parametric and geometric modeling (Grasshopper, Rhino), software for FEM analysis (LIRA-SAPR, SCAD Office, Karamba3D), a review of current regulations, and comparative engineering calculations. The typology of modern structures and principles of their adaptation to complex forms are considered.

Results. By comparing traditional and parametric dome structures, the study demonstrates the impact of geometry on stress-strain behavior and material consumption. Approaches to panelization, development of connection nodes, reinforcement optimization, and consideration of thermal-deformation effects are proposed. Key limitations of the current regulatory framework are identified, along with suggestions for its revision.

Conclusions. Complex architectural forms cannot be realized without thorough engineering analysis and interdisciplinary collaboration. Next-generation building structures enable a synthesis of aesthetics, durability, and technological efficiency, but they require a reassessment of the normative and methodological foundations of design. The findings may be valuable for designers, researchers, and developers of modern building codes.

Keywords: sacral architecture, complex forms, building structures, parametric modelling, FEM analysis, shell structures, joint design, reinforcement, structural optimisation, design standards.