

DOI: 10.32347/2076-815x.2022.80.99-114

УДК 69.07

к.т.н., професор **Гетун Г.В.**,
galinagetun@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3317-3456,
к.т.н., доцент **Кошева В.О.**, vikk-ko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6178-8837,
Кошева І.С., koshevainna@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8224-3759,
Київський національний університет будівництва і архітектури,
к.ф-м.н., доцент **Соломін А.В.**, andr-sol@i.ua, ORCID: 0000-0002-5226-8813,
НТТУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського

ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ ТА ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Широке використання металевих конструкцій у будівництві стало можливо завдяки надбанню архітекторів та інженерів минулих століть. Авторами розглянуті основні визначальні етапи розвитку металу як будівельного матеріалу. Наданий послідовний історичний огляд розвитку металевих конструкцій при зведенні будівель і споруд. На чисельних прикладах проілюстрований шлях розвитку металевих конструкцій – від стояково-балкових систем до криволінійних просторових форм. Розглянуті роботи визначних інженерів-будівельників та архітекторів: Т. Прічарда, Т. Пейна, Р. Бердона, Т. Телфорда, В. Луї, А. Лабруста, Д. Пекстона, Ч. Фокса, Г. Ейфеля, Й.В. Шведлера, Д. Роблінга та ін.[12, 13, 14]. Проаналізований розвиток архітектури, будівельних конструкцій і технологій будівництва у вирішальних фазах історичного розвитку на основі використання методу архітектурних досліджень, який базується на аналізі об'єктивних ознак будівель та споруд, а саме їх функціональних призначеннях і конструктивних можливостей. Досліджені визначальні етапи впровадження та широкого використання металевих конструкцій в практику проектування та будівництва. Узагальнено досвід проектування і будівництва унікальних споруд з великопрогоновими покриттями, прослідкований пошук раціональних конструктивних рішень, надані рекомендації для подальшого перспективного розвитку залізобетонних конструкцій.

Ключові слова: металеві конструкції; сталь; склепіння; конструктивний раціоналізм; металеві ферми; купольні конструкції; аркові ферми; асиметричні поверхні.

Історія розвитку архітектури і будівництва складається з цілого ряду вирішальних факторів. Поштовхом до пошуків нових форм будівель і споруд та розвитку нового розуміння простору стала поява нових конструктивних

матеріалів і пов'язаних з ними нових технологій будівництва. Одночасно з цим архітектура і будівництво розвивалося під впливом потужних соціальних факторів, які визначали не лише мислення і діяння ведучих архітекторів та інженерів, але і нові напрямки в будівництві.

Докорінні зміни в будівництві відбулися у другій половині XIX ст., коли для несучих конструкцій будівель і споруд почали використовувати метал і залізобетон, які відрізняються від природних матеріалів своїми технічними характеристиками – високою міцністю на розтягування і згинання. Метал і залізобетон є штучними матеріалами, тому що для їх виробництва потрібна високо розвинута промисловість [1, 2].

Залізо як матеріал для виготовлення зброї та використання у побуті був відомий з 30 ст. до н. е., про що свідчать знахідки в Месопотамії та Єгипті. Під час розкопок в м. Ур (Месопотамія) був знайдений кинджал, зроблений у 3100 році до н. е., а в піраміді Хеопса – залізний ніж виготовлений у 2660 році до н. е. Залізо – хімічний елемент. За поширенням у природі на нього припадає 5,1% маси земної кори. Частка заліза в речовині Землі досить велика – 38,8 %, найбільша на залізо – поверхня Землі. Залізо є поширеним елементом метеоритної речовини: в кам'яних метеоритах міститься до 25 %, а в залізних 90,85 мас.% Fe. Використання заліза почалося набагато раніше, ніж його виробництво. Перші залізні вироби мали космічне (метеоритне) походження і були виготовлені з уламків метеоритів (рис. 1, а). Час від часу знаходили шматки сірувато-чорного металу, який перековували на кинджали або наконечники списів, які були зброєю міцнішою і пластичнішою, ніж бронзові та довше тримали гострі леза (рис. 1, б).



Рис. 1. **Залізо і залізні вироби:** а – шматок заліза метеоритного походження високої (99,97 %) чистоти; б – кинджал Тутатхамона з метеоритного заліза оздоблений золотою ручкою і золотий футляр, 1330 р. до н. е.

Сталь отримано з чавуну у II ст. до нашої ери китайськими металургами. Спосіб отримав назву «сто очищень» і полягав у багаторазовому інтенсивному обдуванні повітрям розплавленого чавуну під час його перемішування. Це призводило до зменшення частки вуглецю в металі й наближення його до властивостей сталі. Винайдення сталі згадано у трактаті «Хайнаньцзи» у 122 р. до н. е. У Європі подібний спосіб пудлінгування

освоєно лише у другій половині XVIII ст. (патенти братів Томаса і Джорджа Кранеджі та Г. Корта).

«Залізна революція» почалася на межі I тисячоліття до н. е. в Ассирії. З VIII століття до н. е. зварне залізо швидко стало поширюватися в Європі. Першими, хто почав на землях сучасної України виплавляти з болотної руди залізо, були кімерійці (VII ст. до н. е.). У IV...III ст. до н. е. більша частина арсеналу зброї скіфських воїнів – мечі, кинджали, бойові сокири тощо були виготовлені із заліза. У III столітті до н. е. залізо витіснило бронзу в Галлії (історична область Західної Європи), у II столітті нової ери з'явилося у Німеччині, а в VI столітті нашої ери вже широко вживалося в Скандинавії. В Японії залізна доба настала у VIII столітті нашої ери.

На початку I тисячоліття до нової ери – індійські майстри зуміли вирішити проблему отримання пружної сталі без розплавлення заліза. Таку сталь називали булатом, але через складність виготовлення і відсутність необхідних матеріалів у більшій частині світу ця сталь так і залишилася індійським секретом на тривалий час. Більш технологічний шлях одержання пружної сталі, за якого не потрібні ні особливо чиста руда, ні графіт, ні спеціальні печі, було винайдено в Китаї в II столітті нашої ери. Сталь перековували дуже багато разів, під час кожного кування складаючи пластину вдвічі, внаслідок чого виходив відмінний матеріал для зброї, що отримав назву дамаська сталь, з якого, зокрема, робилися японські катани.

Методи отримання заліза у ті часи були дуже примітивними, а тому залізо виготовляли у мізерних кількостях, воно було занадто дорогим для використання в будівництві. Перші доменні печі для виплавляння заліза з'явилися в IV ст. у Китаї, в Європі у Вестфалії (Німеччина) лише у XV ст., а в Англії у 1490-х роках. Саме у Китаї в 1075 р. вперше була занотована вченими Шен Куо ідея поліпшення якості заліза шляхом продування повітрям розплавленого чавуну – прототип бесемерівського процесу. З XVI століття в Європі набув поширення так званий переробний процес у металургії – технологія, за якого залізо при високих температурах плавлення та інтенсивного науглецьовування перетворюється на чавун, а вже потім, рідкий чавун, звільняючись від зайвого вуглецю при відпалі в горнах, перероблявся на сталь [7, 14].

Чавун – сплав заліза з вуглецем (понад 2 % вуглецю за масою) та іншими елементами, який характеризується наявністю евтектичного перетворення: нестабільного (цементитного) або стабільного (графітного). Чисте залізо має обмежене застосування. В техніці зазвичай використовують сплави заліза з вуглецем, які поділяють на сталі та чавуни. Сталі містять до 2 % вуглецю, а чавуни – від 2,14 до 6 %. Чавун був відомий античним європейським металургам з IV століття до н. е. Він утворювався у сиродутних горнах разом з основним

продуктом – крицею (губчастим залізом) при відхиленнях від сиродутного процесу. Давньогрецький енциклопедист Арістотель відзначав, що при великому нагріванні у горні може утворитись рідке залізо, яке після застигання відрізняється від звичайного заліза. На території України унікальною є знахідка уламків чавунного казана на поселенні біля села Миколаївка Одеської області в шарах IV...III століть до н. е. Залізо видобували з бурих залізників, озерних і болотних руд. Руда випалювалася на відкритому вогні, а пізніше в ямах або глиняних печах, куди закладалися деревне вугілля та ковальськими міхами нагніталася повітря. Після випалювання осідала «криця», яку піддавали гартуванню. Кричне залізо, як в ковке через високу трудомісткість не отримувало широкого використання в будівництві [3, 11, 14].

Нове знайомство європейських металургів з чавуном, причому в більших масштабах, відбулося вже за Середньовіччя, у XI...XII століттях, так само при відхиленнях від сиродутних процесів, які провадився на той час вже у великих сиродутних печах заввишки до 4...5 м – штюхофенах. Чавун не піддається кування через свою ламкість і спочатку його вважали небажаним відходом виробництва, утворення якого зменшувало вихід придатного продукту – криці. Перший європейський чавун виплавили на теренах сучасної Італії наприкінці XIV ст., майже одночасно в австрійській Штирії. Лише згодом з чавуну навчилися робити відливки і почали використовувати його в ливарництві. З нього виготовляли посуд, гармати, прилади для камінів тощо. Ще пізніше навчилися повторно переплавляти його з рудою у кричному горні й отримувати з нього ковке залізо. При цьому було помічено, що виплавка напівпродукту – чавуну – в одному агрегаті та подальша його переробка на ковке залізо в іншому агрегаті має велику економічну ефективність порівняно з прямим сиродутним процесом отримання заліза у сиродутних горнах.

Ковке залізо – майже чисте низьковуглецеве залізо, що було продуктом нині застарілих способів виробництва заліза: сиродутного способу, кричної переробки та пудлінгування. Містить лише 0,1...0,3 % вуглецю, незначну кількість сірки, фосфору і кремнію. Ковке залізо отримало свою назву через придатність до обробки куванням, на відміну від чавуну, що не піддається куванню (через його ламкість, спричинену високим вмістом вуглецю). В минулому ковке залізо широко використовувалося для виробництва залізних виробів, що в наш час виготовляються зі сталі. До 1870-х років ковке залізо було головним металевим конструкційним матеріалом, пізніше, з розвитком методів масового виробництва ливарної сталі, його частка у продукції металургійних підприємств різко знизилася. В середині 20 століття (1946 р.) світове виробництво ковкаго заліза становило менше 3 % від виробництва сталі.

Найдавнішою спорудою, виготовленою з ковкого заліза є велика **Залізна колона**, що встановлена в Делі у 415 р. н. е. в межах комплексу мечетей Кутб-Мінар – найстарішого мусульманського храмового комплексу в Індії (рис. 2,а). Залізна колона висотою 7,3 м виконана в формі зрізаного конуса з діаметром 416 мм біля основи та 300 мм при вершині. Її нижня частина заглиблена на 0,5 м у землю. Вага колони становить близько 6,5 т. Колона має два написи, присвячені двом індійським правителям: Чандрагупті, який правив наприкінці III – початку IV ст. та Ананг Палу – XI ст. Колона була вироблена методом ковальського зварювання, сиродутним способом, що вимагало застосування у виробництві деревного вугілля. Колона складається з чистого заліза (99,7 %) із незначним вмістом фосфору (0,114%), вуглецю (0,08%), кремнію (0,046%), азоту (0,032%) та сірки (0,006%), що приблизно відповідає низьковуглецевій сталі.

У XVII...XVIII ст. залізні конструкції почали використовувати для нахилених кроквяних конструкцій покриттів і просторових купольних конструкцій завершень церков (рис. 2, б, в). Стрижні конструкцій виготовлялися на ковальсько-горновому зварюванні та мали замкові з'єднання за допомогою обойм. Кроквяні системи перекривали прогони будівель до 20 м найчастіше із середніми стовпами (рис. 2, б). Вони були приставними, а не висячими і склалися з кроквяних ніг підпертих залізними стійками або підкосами, які спиралися на нижнє, зазвичай склепінчасте, перекриття або на конструкції, що оточували склепіння.

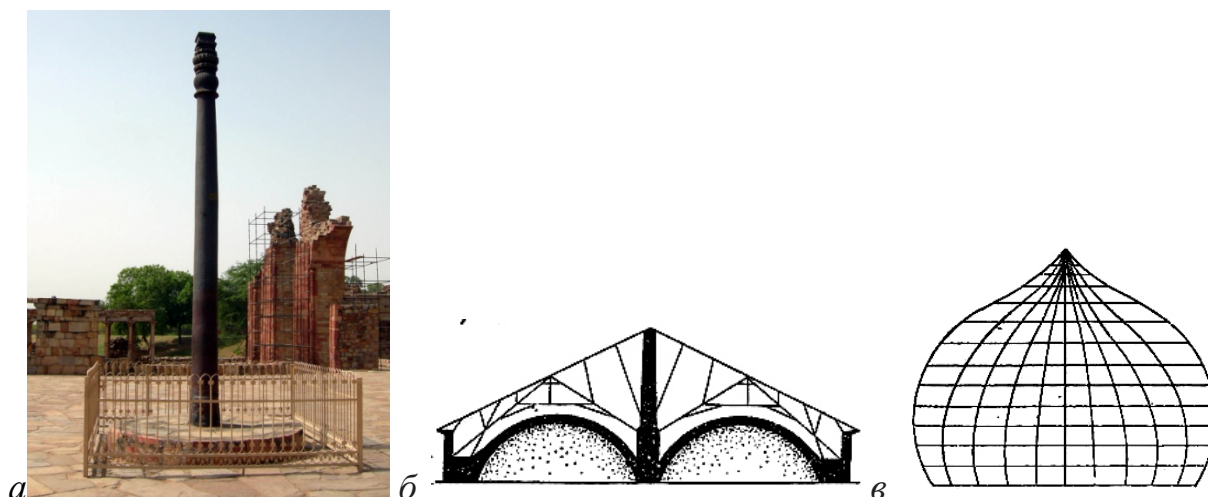


Рис. 2. Перші металеві конструкції: а – залізна колона, Делі, Індія, 415 р.; б – нахилені крокви покриття; в – каркас купольного завершення церков

У Європі конструкції з ковкого заліза почали використовувати у будівництві у XVIII ст. У 1779 році у графстві Шропшир (Великобританія) був зведений перший міст з ковкого заліза через річку Северн за проектом інженера Томаса Прітчарда (рис. 3, а). Основний прогін мосту перекривають

п'ять напівциркульних чавунних арок довжиною 30,5 м і висотою 13,7 м. Це був перший металевий міст такого роду, який не мав аналогів, а тому зведений за принципами будівництва дерев'яних мостів. Всі чавунні елементи арок були відлиті окремо і потім об'єднані поміж собою так, як це було прийнято у дерев'яному будівництві «шип-паз» і «ластівковий хвіст». Для кріплення половинок ребер верхнього настилу моста довжиною понад 20 м з верхніми поясами арок використали болти. У 1796 р. за задумом Томаса Пейна (надав проєкти і моделі) під керівництвом інж. Роуланда Бердона був зведений другий чавунний міст в Англії довжиною 72 м – Вірмутський, який став тріумфом нової металургії та інженерної винахідливості (рис. 3,б). Міст складався з шести ребер, а кожне ребро з 105 пустотілих чавунних блоків, скріплених болтами, які працювали як елементи склепіння. Таким чином, збільшення величини прогону було досягнуте відтворенням у металі кам'яної конструкції. Цей міст декілька разів перебудовували, а остаточно зруйнували у 1929 р. [3, 10, 12].



Рис. 3. Перші мости з ковкого заліза: *а* – залізний міст через річку Северн, графство Шропшир, Великобританія, інж. Т. Прітчард, 1779 р.; *б* – Вірмутський чавунний міст через річку Уір, м. Сандерленд, Великобританія, інж. Т. Пейн, Р. Бердон, 1796 р.

Великий внесок у розвиток сучасних будівельних конструкцій з використанням металів вніс шотландський інженер-будівельник Томас Телфорд (1757...1834 рр.), який перший у 1800 році почав використовувати для перекриттів мостових прогонів балки з ковкого заліза. Інженер Т. Телфорд досяг значних успіхів у будівництві транспортних акведуків для судноплавних каналів та аркових і підвісних мостів з використанням ковкого заліза. (рис. 4). У 1795...1805 рр. за проєктом Т. Телфорда зводиться акведук над долиною річки Ді на північному сході Уельса біля Ланголена для Ланголенського судноплавного (рис. 4, *а*). Опори акведука Понткісіллте висотою 38 м зроблені з каменю, а арки і канал довжиною 307 м, глибиною 1,6 м, шириною 3,4 м – з ковкого заліза. У 2009 році акведук внесено до Світової спадщини ЮНЕСКО, він досі перебуває у експлуатації. Томас Телфорд спроектував перші підвісні мости у Великобританії: через р. Менай, основний прогін якого довжиною 176 м тримається на 16-ти

ланцюгах з ковкого заліза (рис. 4, в) та його меншу копію – підвісний міст через р. Конві прогоном 125 м (рис. 4, б).

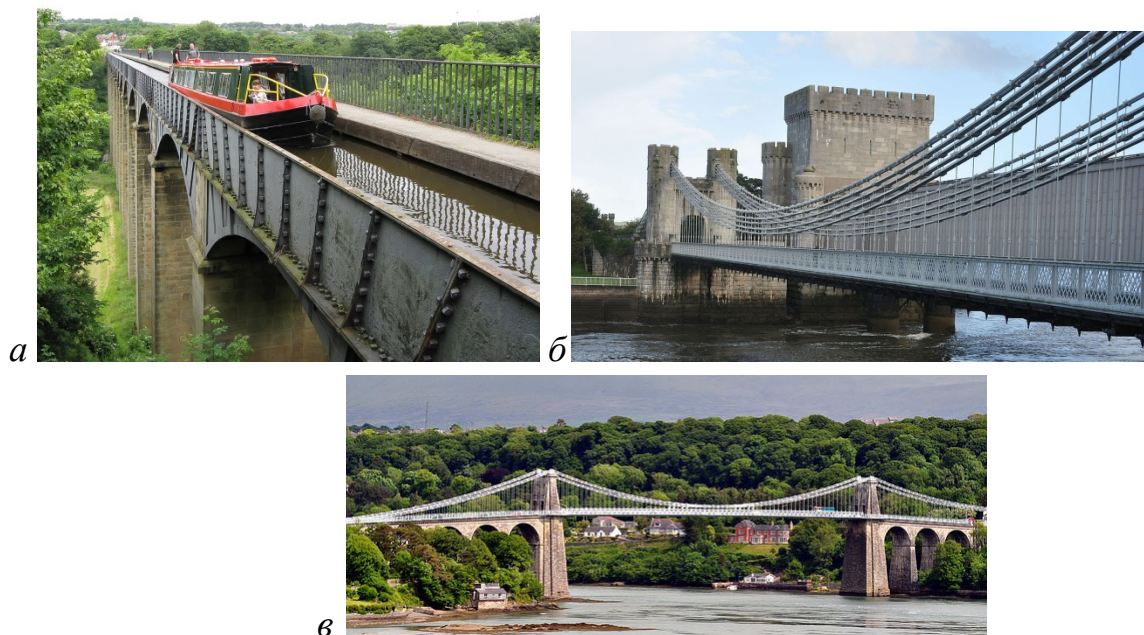


Рис. 4. Споруди, виготовлені з ковкого заліза за проектами Т. Телфорда у Великобританії: а – судноплавний акведук Понткісіллте, 1795...1805 р.; б – підвісний міст через р. Конві, 1822...1826 рр.; в – Підвісний міст через протоку Менай, м. Бангор, 1819...1826 рр.

Конструкції з чавуну починають використовувати в промисловому будівництві Великобританії: в 1783 р. – в будівлі мануфактури біля м. Манчестера були використані несучі чавунні колони, а в 1801 р. в м. Селфорді, в 7-ми поверховій будівлі бавовняної фабрики шириною 14 м і довжиною 42 м – внутрішній каркас з чавунних стійок і балок. У ХІХ ст. чавун нарівні із залізом та у поєднанні з ним використовувався для зведення театрів і соборів у країнах Європи. Одним з перших залізні конструкції почав використовувати для покриттів зальних приміщень театрів французький архітектор Віктор Луї (1731...1800 рр.). У 1786 році за його проектом у Парижі зводиться будівля театру французької комедії «Salle Richelieu» з металевими конструкціями покриття над залами (рис. 5).

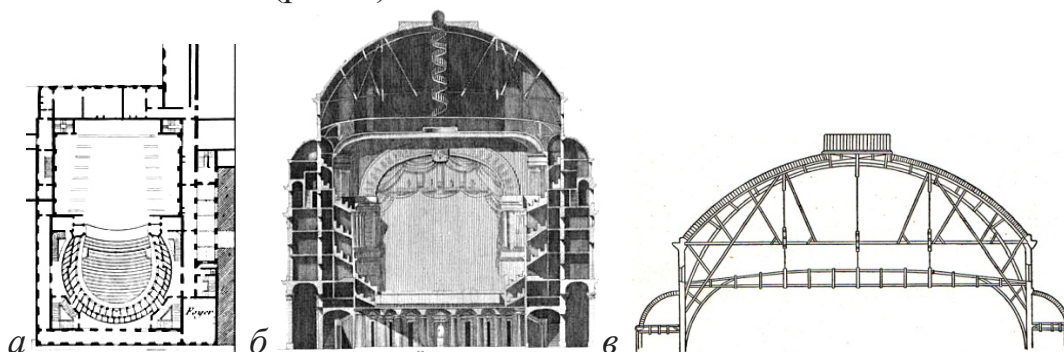


Рис.5. Театр французької комедії «Salle Richelieu», м. Париж, Франція, арх. Віктор Луї, 1786 р.: а, б – схеми плану і розрізу; в – конструкція покриття

У другій половині XIX ст. У Європі намічається тенденція використання нових будівельних матеріалів і технологій для будівель, розрахованих на велику кількість відвідувачів з покриттями зальних приміщень великих розмірів. Вперше металеві конструкції для покриттів зальних приміщень у Франції використав в 1843...1850 рр. арх. А. Лабруст у бібліотеці св. Женев'єви в Парижі (рис.6). В інтер'єрі читальної зали другого поверху бібліотеки св. Женев'єви встановлені 16-ть тонких чавунних колон, які розділяють простір на два прогони і підтримують ґратчасті арки з кованого заліза, а несучі циліндричні гіпсові склепіння підсилені залізною сіткою. В цій будівлі вперше використані відкриті в інтер'єрі читальної зали металеві конструкції (рис. 1.86, д). Новаторство арх. А. Лабруста особливо помітне на тлі зовнішнього вигляду бібліотеки в архітектурних формах Відродження і класицизму.

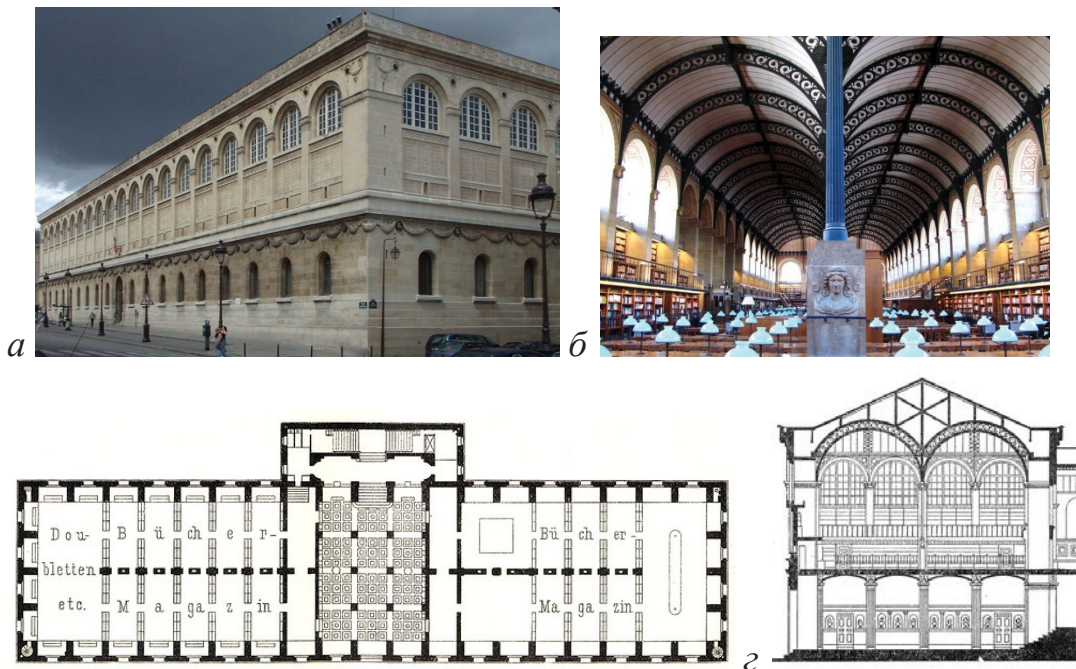


Рис. 6. Бібліотека св. Женев'єви, м. Париж, Франція, арх. А. Лабруст, 1843...1850 рр.: а – зовнішній вигляд; б – інтер'єр читальної зали 2-го поверху; в – план 1-го поверху; г – розріз

Подібний конструктивний раціоналізм прийнятий А. Лабрустом в приміщеннях Головних читальних залів і книгосховища Національної бібліотеки збудованих у 1860...1868 рр. у Парижі (рис. 7) [8]. Унікальними є конструкції покриттів читальних залів з освітлювальними прорізами. Несучими конструкціями для дев'яти склепінь покриття читальної зали Лабруста є металеві арки півциркульного окреслення, що спираються на 16 тонких чавунних колон діаметром 300 мм висотою майже по 10 м. Півциркульні арки покриття з'єднані колонами утворюють дев'ять сферичних склепінь, на які спираються тонкі фаянсові плити (рис. 7, а). В центрі кожного склепіння розміщений круглий проріз для забезпечення рівномірної освітленості всіх

столів читальної зали. Світлопрозоре покриття Овальної зали виготовлене з металевих ферм, які спираються на чавунні колони (рис. 7, б). Унікальним є конструктивне рішення чотириповерхового книгосховища бібліотеки (рис. 7, в). Ґратчасті чавунні конструкції стелажів для книг складаються із стійок, балок і ґратчастих полиць, а вхід до книгосховища з читальної зали має вигляд стіни із скла висотою 9 м розчленованої лише декількома металевими профілями.



Рис. 7. Інтер'єри приміщень Національної бібліотеки, м. Париж, Франція, арх. А. Лабруст, 1860...1868 рр.: а – читальна зала із склепінчастими покриттями; б – овальна читальна зала; в – книгосховище

Прогресу металевих конструкцій сприяли всесвітні виставки, основною метою яких була пропаганда новітніх технічних досягнень. Перша всесвітня виставка була проведена у Великобританії в 1851 р. за ініціативою принца Альберта в Лондоні в Гайд-парку. Основним виставковим павільйоном став «Кришталевий палац» за проектом арх. Джозефа Пекстона та інж. Чарльза Фокса (рис. 8).

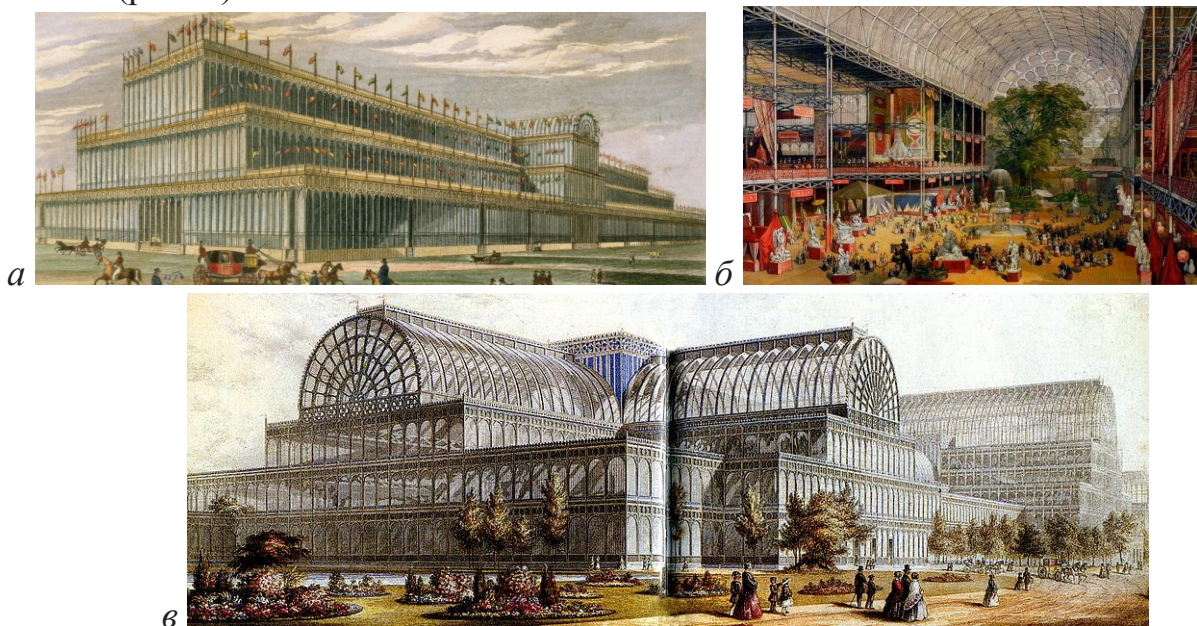


Рис. 8. Кришталевий палац, Гайд-парк, м. Лондон, Великобританія, арх. Джозеф Пекстон, інж. Чарльз Фокс, 1851 р.: а – зовнішній вигляд; б – внутрішній інтер'єр; в- Кришталевий палац, Сайденхем, м. Лондон, арх. Джозеф Пекстон, інж. Чарльз Фокс 1854 р.

Будівля довжиною 564 м і загальною площею 74400 м² була споруджена за чотири місяці, завдяки використанню збірних панелей, які склалися з чавунних колон з кроком 7,2 м, балок з кованого заліза, дерева і листового скла. В будівлі використані оригінальні плоскі конструкції покриттів триповерхових галерей з перекриттями із залізних ферм з перехресними ґратами з'єднаних за допомогою литих скоб і кованих залізних затяжок. З кожної ділянки плоского покриття із зашкленених панелей дощова вода стікала по дерев'яних жолобах в пустотілі чавунні колони. Середній трансепт був перекритий циліндричним склепінням, під яким залишилися в'язи Гайд-парку – павільйон споруджували прямо над ними (рис. 8, б). Для зашклення покриття і верхніх ярусів зовнішніх стін були використанні величезні для того часу листи скла 1200 x 250 мм, вставлені в дерев'яні рами. Виставковий павільйон наочно продемонстрував архітектурні можливості металу. Після виставки палац в Гайд-парку був розібраний і більша частина його панелей і конструкцій використана для спорудження в Сайденхемі, на півдні Лондона, в 1854 р. нового удосконаленого «Кришталевого палацу», в якому дерев'яні арки замінили на металеві (рис.8, в). Цей палац згорів в 1936 році [8]. Спорудження «Кришталевого палацу» в Лондоні стало своєрідним переворотом в історії будівництва і архітектури, його раціональні конструкції випередили свій час, подібні «палаці» побудували для виставок у Нью-Йорку (1853 р.), Мюнхені (1854 р.), Порту (1865 р.). У великих містах Європи почали зводити дебаркадери залізничних вокзалів з використанням кованого заліза і листового скла.

В XIX ст. в спорудах з чавуну і заліза визначилися характерні конструктивні, композиційні та естетичні властивості металу як нового будівельного матеріалу. Але остаточне затвердження металу в будівництві пов'язане з розвитком сталевих конструкцій. Швидке розповсюдження металевих конструкцій в будівництві розпочалося після відкриття промислових способів отримання сталі, які змінили характер металургії: бесемерівського (1855 р.), мартенівського (1865 р.), томасівського (1878 р.) та електрометалургійного (1900 р.). Промислова сталь, яка мала кращі показники міцності на розтягувальні зусилля, на початку XX ст. повністю витісняє з будівництва низькоякісне залізо і чавун, а ковальські способи з'єднань елементів замінюються клепанням [9].

Важливу роль в процесах використання сталі в будівництві у XIX ст. відіграли розвиток будівельної механіки, опору матеріалів, теорії пружності та методів розрахунків металевих конструкцій, а саме: теорія пружності в математичному вигляді (1821 р.) та модулі пружності як характеристики металів, які започаткував французький інженер Клод Луї Нав'є (1785...1836 рр.); роботи французького фізика і математика Сімеона-Дені Пуассона

(1781...1840 рр.), який розв'язав ряд задач з теорії пружності, ввів коефіцієнт Пуасона (коефіцієнт поперечної деформації) та узагальнив рівняння теорії пружності на анізотропні тіла; роботи французьких інженерів і математиків Габрієля Ламе (1795...1870 рр.) і Бенуа Поль Клайперона, які в рамках досліджень, присвячених теорії пружності вивчали стійкість арок, встановили положення перерізів руйнування для кругових арок сталих поперечних перерізів, написали мемуари про внутрішню рівновагу твердих тіл з однорідних матеріалів; графічний метод визначення зусиль в плоских статично визначених фермах (діаграми Максвелла-Кремони) розроблені у 1864 р. англійським фізиком Джеймсом Клерком Максвеллом (1831...1879 рр.) та італійським математиком Луїдже Кремона (1830...1903 р.) та інші науковці, які займалися графічними і графоаналітичними методами розрахунків конструкцій та споруд [5, 14, 15].

Великий внесок у вивчення структурних властивостей і характеристик металів та розвиток металевих конструкцій зробив видатний французький інженер Гюстав Ейфель. Найвидатнішими спорудами Г. Ейфеля з використанням ковкого заліза методом пудлінгування є: залізничний арочний міст прогоном 160 м Марія Пія зведений у 1877 р. через річку Дору у м. Порту в Португалії (рис.9, а); Віадук Гарабі через річку Трюєр у Франції, основний прогін якого перекриває арка довжиною 180 м і висотою 60 м (рис.9, б); Ейфелева вежа висотою 300 м (після встановлення антени – 325 м) зведена в Парижі у 1889 р. (рис. 1.91, в) та інші.

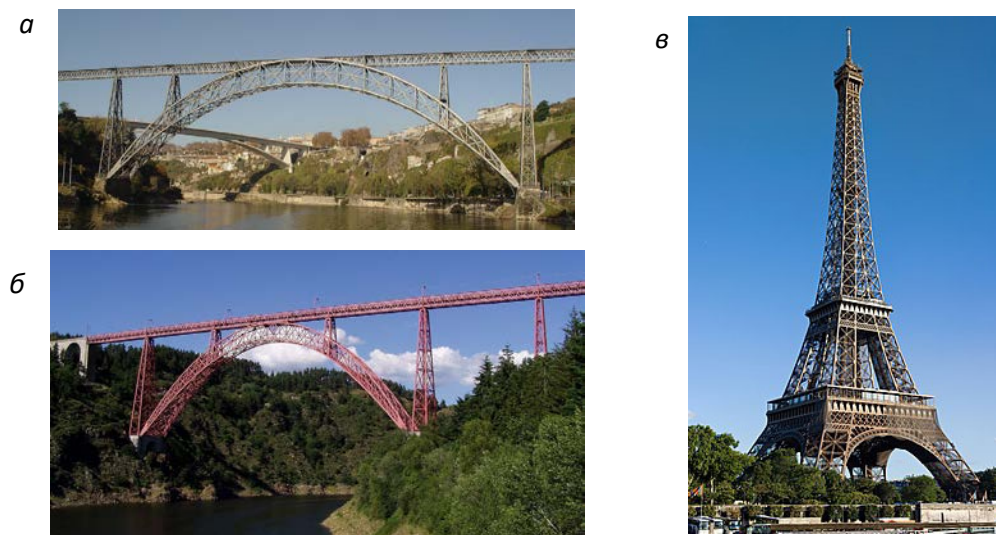


Рис. 9. Споруди, виготовлені з ковкого заліза, інж. Г. Ейфель:

а – Залізничний міст Марія Пія, річка Дору, м. Порту, Португалія, 1877 р.; б – віадук Гарабі, річка Трюєр, Франція, 1885 р.; в – Ейфелева вежа, м. Париж, Франція, 1889 р.

У другій половині XIX ст. отримали розвиток просторові купольні конструкції покриттів з металу. Споруджуються будівлі з новаторськими

купольними конструкціями покриттів. Спочатку ребристі з радіальними арковими фермами і прямолінійними нижніми поясами (купол еліптичної форми концертної зали Альберт-Холлу в Лондоні, 1867...1871 рр., арх. Ф. Фоук і Д. Гілберт Скот) діаметром 83 x 72 м, висотою 41 м, з металевими ребрами та скляними панелями (рис. 10, а, б). Пізніше ребристо-кільцеві (купол Галереї Вітторіо Емануїла в Мілані, 1865...1877 рр., арх. Джузеппе Менгоні) діаметром 36 м і висотою 47 м (рис. 10, в). В 1863 р. починається розповсюдження більш економічного металевого купола, запроєктованого німецьким інженером Й. В. Шведлером, який отримав його ім'я, – купол системи Шведлера. Поверхню купола Й.В. Шведлера утворюють радіальні, кільцеві та діагональні стрижні – купол над газгольдером «Ель-бункер» діаметром 54,9 м, 1875 р. для вуличного освітлення Берліна (рис. 10, г) [5, 6].

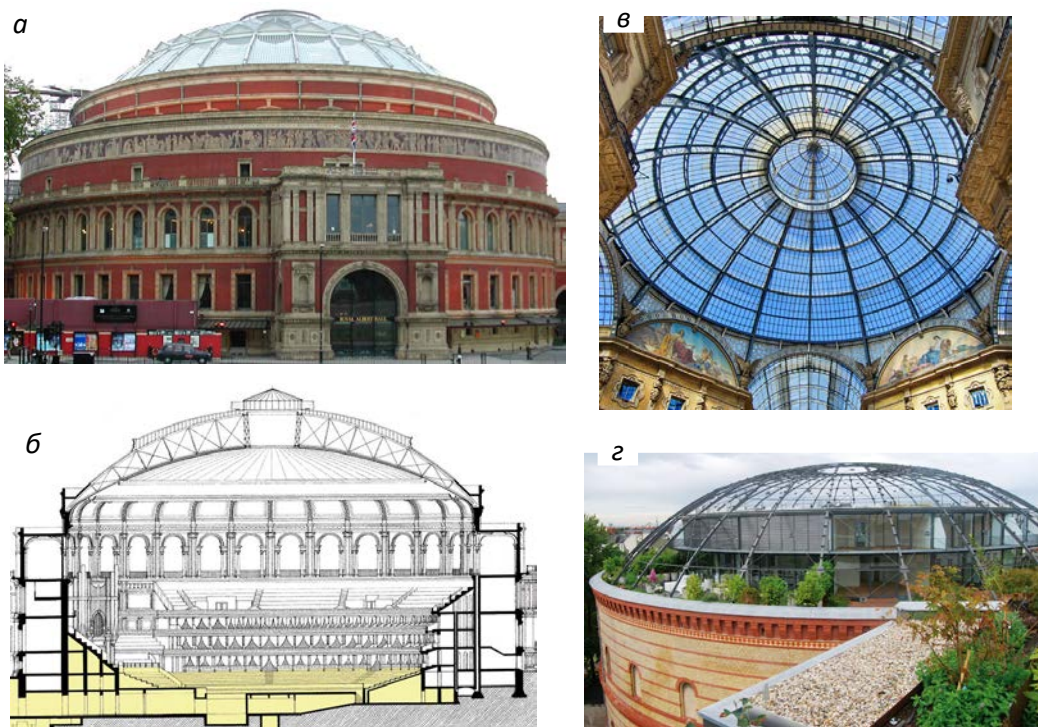


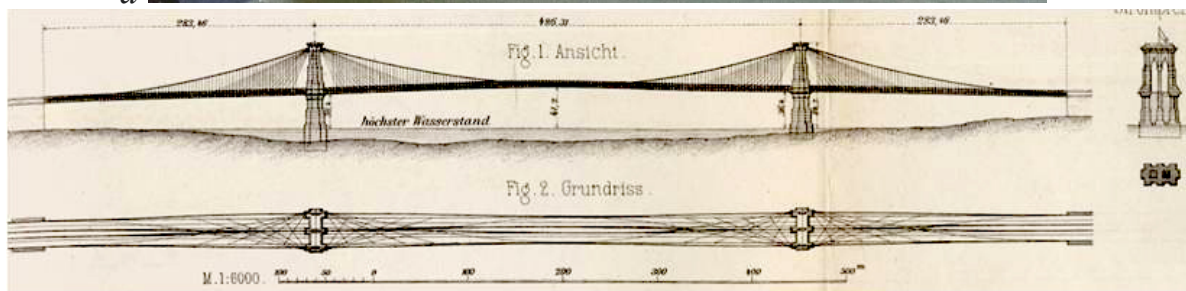
Рис. 10. Купольні конструкції покриттів з металу: а, б – концертний зал Альберт-Холл, м. Лондон, Великобританія, 1867...1871 рр., арх. Ф. Фоук і Д. Гілберт Скот; в – галерея Вітторіо Емануїла, м. Мілан, Італія, 1865...1877 рр., арх. Д. Менгоні; г – газгольдер «Ельбункер», м. Берлін, Німеччина, інж. Й. В. Шведлер

Талановитими фахівцями, які своєю діяльністю сприяли прогресу будівельної техніки, були американські інженери – батько, син і невістка Джон Роблінг, Вашингтон Роблінг і Емілі Роблінг, за проєктом і під керівництвом яких в 1870...1883 роках був споруджений Бруклінський міст, що з'єднав райони Бруклін і Манхеттен у м. Нью-Йорку. Грандіозний за розмірами Бруклінський висячий міст довжиною 1825 м і шириною 26 м своїм

конструктивним рішенням і блискучим використанням новітніх матеріалів визначив сміливий прорив інженерів у будівельній справі наступних періодів розвитку США і всього світу. На момент закінчення будівництва він був найдовшим підвісним мостом світу і першим, в якому використали сталевий дріт. Три прогони моста з'єднують дві опорні вежі, виконані в стилі неоготики з вапняку, граніту і цементу. Довжина середнього прогону – 486,3 м (рис. 11).



а



б

Рис. 11. Бруклінський висячий міст, м. Нью-Йорк, США, інж. Д. Роблінг, В. Роблінг, Е. Роблінг, 1870...1883 рр.: а - зовнішній вигляд; б - креслення фасаду, розрізу і плану

Висновки. Проаналізовані авторами етапи розвитку металевих конструкцій показують широкі можливості для їх практичного використання при проектуванні громадських будівель та споруд.

Список літератури

1. Гетун Г.В. Архітектура будівель та споруд. Книга 1. Основи проектування: Підручник для вищих навчальних закладів. – Видання друге, перероблене та доповнене / Гетун Г. В. – К.: Кондор-Видавництво. 2012. – 380 с.: іл.
2. Голосов В.Н., Ермолов В.В., Лебедев Н.В. и др. Инженерные конструкции: Учебник для вузов / Голосов В.Н., Ермолов В.В., Лебедев Н.В. и др. под общ. ред. Ермолова В.В. – М.: Высшая школа, 1991. – 408 с.: ил.
3. Гуляницкий Н.Ф. Архитектура гражданских и промышленных зданий: Учебник для вузов. В 5-ти т. Т. 1. История архитектуры / Гуляницкий Н.Ф. – М.: Стройиздат, 1984. – 334 с., ил.

4. Дыховичный Ю.А. Большепролетные конструкции сооружений «Олимпиады-80» в Москве: (конструкторский поиск, исследования, проектирование, возведение) / Ю.А. Дыховичный. – М.: Стройиздат, 1982. – 277 с.
5. Куліков П.М., Плоский В.О., Гетун Г.В. Архітектура будівель та споруд. Книга 5. Промислові будівлі: Підручник для вищих навчальних закладів / Куліков П.М., Плоский В.О., Гетун Г.В. – Кам'янець-Подільський: Видавництво «Рута». 2020 р. – 820 с.: іл.
6. Куліков П.М., Плоский В.О., Гетун Г.В. Конструкції будівель і споруд. Книга 1: Підручник для вищих навчальних закладів / Куліков П.М., Плоский В.О., Гетун Г.В. – К.: Видавництво «Ліра-К». 2021 р. – 820 с.: іл.
7. Маклакова Т.Г. История архитектуры и строительной техники. Т. 1. Зодчество доиндустриальной эпохи: Научное издание. М.: Издательство АСВ, 2006, – 408 с., ил., Т. 2. Современная архитектура: Научное издание. М.: Издательство АСВ, 2009, – 372 с., ил.
8. Мардер А.П. Металл в архитектуре / А.П. Мардер. – М.: Стройиздат, 1980. – 232 с
9. Нілов О.О., Пермяков В.О. та ін. Металеві конструкції: Загальний курс: Підручник для вищих навчальних закладів / Нілов О.О., Пермяков В.О. та ін. – К.: Видавництво «Сталь», 2010. – 869 с.: іл.
10. Орельская О.В. Современная зарубежная архитектура: учебное пособие для студ. Высш. Учеб. Заведений / Орельская О.В. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с., ил.
11. Плоский В.О., Гетун Г.В. Архітектура будівель та споруд. Книга 2. Житлові будинки: Підручник для вищих навчальних закладів. – Видання третє, перероблене і доповнене / Плоский В.О., Гетун Г.В. – Кам'янець-Подільський: Видавництво «Рута». 2017 р. – 736 с.: іл.
12. Плоский В.О., Гетун Г.В., Віроцький В.Д. Архітектура будівель та споруд. Книга 3. Історія архітектури і будівництва: Підручник для вищих навчальних закладів. – Видання друге, перероблене і доповнене / Плоский В.О., Гетун Г.В., Віроцький В.Д. – К.: Видавництво «Ліра-К», 2016 р. – 816 с.: іл.
13. Юрген Едике История современной архитектуры / Юрген Едике. – М.: Искусство, 1972. – 247 с.
14. Всеобщая история архитектуры в 12 томах. Главн. редактор Баранов Н.В. – М.: Издательство литературы по строительству, 1970...1977.
15. V.A. Bazhenov, V.V. Gaidaichuk, A.P. Koshevoi Stability of multiply connected ribbed shells and plates in a magnetic field. – Journal of Soviet Mathematics. Vol.66/ Issue. 6, 1993, p. 2631-2636.

Ph.D., professor **Getun Galina**,
 Ph.D., associate professor **Kosheva Victoria, Kosheva Inna**,
 Kyiv National University of Construction and Architecture,
 Ph.D., associate professor **Solomin Andrey**,
 National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

EXPERIENCE IN USE AND HISTORY OF DEVELOPMENT OF METAL STRUCTURES

The widespread use of metal structures in construction became possible thanks to the work of architects and engineers of past centuries. The authors considered the main defining stages in the development of metal as a building material. A consistent

historical review of the development of metal constructive forms in public buildings is presented. Numerous examples illustrate the path of development of metal structures - from post-and-beam systems to curvilinear spatial forms. The works of outstanding civil engineers and architects are considered: T. Pritchard, T. Payne, R. Burdon, T. Telford, V. Louis, A. Labrust, D. Paxton, C. Fox, G. Eiffel, I.V. Shwedler, D. Roebling and others. The development of architecture, building structures and construction technologies in decisive historical phases is analyzed. The method of architectural research was used, based on the analysis of objective features of buildings and structures, namely their functional purposes and design capabilities. The defining stages of the introduction and widespread use of metal structures in the practice of design and construction are investigated. The experience of designing and building unique structures with large-span coatings, rational design solutions is summarized, recommendations are given for the further promising development of metal structures.

Key words: metal structures; steel; vault; constructive rationalism; metal farms; dome structures; arched farms; asymmetrical surfaces.

REFERENCES

1. Getun G.V. Arkhitektura budivel' ta sporud. Kniga 1. Osnovi proyektuvannya: Pidruchnik dlya vishchikh navchal'nikh zakladiv. – Vidannya druge, pereroblene ta dopovnene / Getun G.V. – K.: Kondor-Vidavnitstvo. 2012. – 380 s.: il. {in Ukrainian}
2. Golosov V.N., Yermolov V.V., Lebedev N.V. i dr. Inzhenernyye konstruksii: Uchebnik dlya vuzov / Golosov V.N., Yermolov V.V., Lebedev N.V. i dr. pod obshch. red. Yermolova V.V. – M.: Vysshaya shkola, 1991. – 408 s.: il. {in Russian}
3. Gulyanitskiy N.F. Arkhitektura grazhdanskikh i promyshlennykh zdaniy: Uchebnik dlya vuzov. V 5-ti t. T.1. Istoriya arkhitektury / Gulyanitskiy N.F. – M.: Stroyizdat, 1984. – 334 s., il. {in Russian}
4. Dykhovichnyy Yu.A. Bol'sheproletnyye konstruksii sooruzheniy «Olimpiady-80» v Moskve: (konstruktorskiy poisk, issledovaniya, proyektirovaniye, vozvedeniye) / Yu.A. Dykhovichnyy. – M.: Stroyizdat, 1982. – 277 s. {in Russian}
5. Kulikov P.M., Ploskiy V.O., Getun G.V. Arkhitektura budivel' ta sporud. Kniga 5. Promislovi budivli: Pidruchnik dlya vishchikh navchal'nikh zakladiv / Kulikov P.M., Ploskiy V.O., Getun G.V. – Kam'yanets'-Podil's'kiy: Vidavnitstvo «Ruta». 2020 r. – 820 s.: il. {in Ukrainian}
6. Kulikov P.M., Ploskiy V.O., Getun G.V. Konstruksii budivel' i sporud. Kniga 1: Pidruchnik dlya vishchikh navchal'nikh zakladiv / Kulikov P.M., Ploskiy V.O., Getun G.V. – K.: Vidavnitstvo «Lira-K». 2021 r. – 820 s.: il. {in Ukrainian}

7. Maklakova T.G. Istoriya arkhitektury i stroitel'noy tekhniki. T.1. Zodchestvo doindustrial'noy epokhi: Nauchnoye izdaniye. M.: Izdatel'stvo ASV, 2006, – 408 s., il., T.2. Sovremennaya arkhitektura: Nauchnoye izdaniye. M.: Izdatel'stvo ASV, 2009, – 372 s., il. {in Russian}
8. Marder A.P. Metall v arkhitekture / A. P. Marder. – M.: Stroyizdat, 1980. – 232 s. {in Russian}
9. Nilov O.O., Permyakov V.O. ta in. Metalevi konstruktsii: Zagal'niy kurs: Pidruchnik dlya vishchikh navchal'nikh zakladiv / Nilov O.O., Permyakov V.O. ta in. – K.: Vidavnitstvo «Stal'», 2010. – 869 s.: il. {in Ukrainian}
10. Orel'skaya O.V. Sovremennaya zarubezhnaya arkhitektura: uchebnoye posobiye dlya stud. Vyssh. Ucheb. Zavedeniy / Orel'skaya O.V. – M.: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2006. – 272 s., il. {in Russian}
11. Ploskiy V.O., Getun G.V. Arkhitektura budivel' ta sporud. Kniga 2. Zhitlovi budinki: Pidruchnik dlya vishchikh navchal'nikh zakladiv. – Vidannya tretê, pereroblene i dopovnene / Ploskiy V.O., Getun G.V. – Kam'yanets'-Podil's'kiy: Vidavnitstvo «Ruta». 2017 r. – 736 s.: il. {in Ukrainian}
12. Ploskiy V.O., Getun G.V., Virots'kiy V.D. Arkhitektura budivel' ta sporud. Kniga 3. Istoriya arkhitekturi i budivnitstva: Pidruchnik dlya vishchikh navchal'nikh zakladiv. – Vidannya druge, pereroblene i dopovnene / Ploskiy V.O., Getun G.V., Virots'kiy V.D. – K: Vidavnitstvo «Lira-K», 2016 r. – 816 s.: il. {in Ukrainian}
13. Yurgen Yedike Istoriya sovremennoy arkhitektury / Yurgen Yedike. – M.: Iskusstvo, 1972. – 247 s. {in Russian}
14. Vseobshchaya istoriya arkhitektury v 12 tomakh. Glavn. redaktor Baranov N. V. – M: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1970...1977. {in Russian}
15. Bazhenov V.A., Gaidaichuk V.V., Koshevoi A.P. Stability of multiply connected ribbed shells and plates in a magnetic field. – Journal of Soviet Mathematics. Vol.66/ Issue. 6, 1993, p. 2631-2636. {in English}