



## **CHAPTER 12 / РОЗДІЛ 12**

### **CURRENT CONDITION OF DESIGN, CALCULATION, CONSTRUCTION AND OPERATION OF BURIED HIGHWAY BUILDINGS FROM METAL CORRUGATED STRUCTURES**

Конструкції з металевих гофрованих листів являють собою великий практичний інтерес для транспортного, промислового та цивільного будівництва. Вони можуть застосовуватися в якості водопропускних споруд, шляхопроводів, тунелів різного призначення, галерей, тощо. Металеві гофровані конструкції (МГК) економічні як у будівництві (їх зведення у деяких випадках обходиться у кілька разів дешевше ніж будівництво аналогічних мостових споруд), так і в експлуатації (висока якість будівельно-монтажних робіт при мінімальних експлуатаційних витратах). Металеві гофровані конструкції мають гарні характеристики міцності.

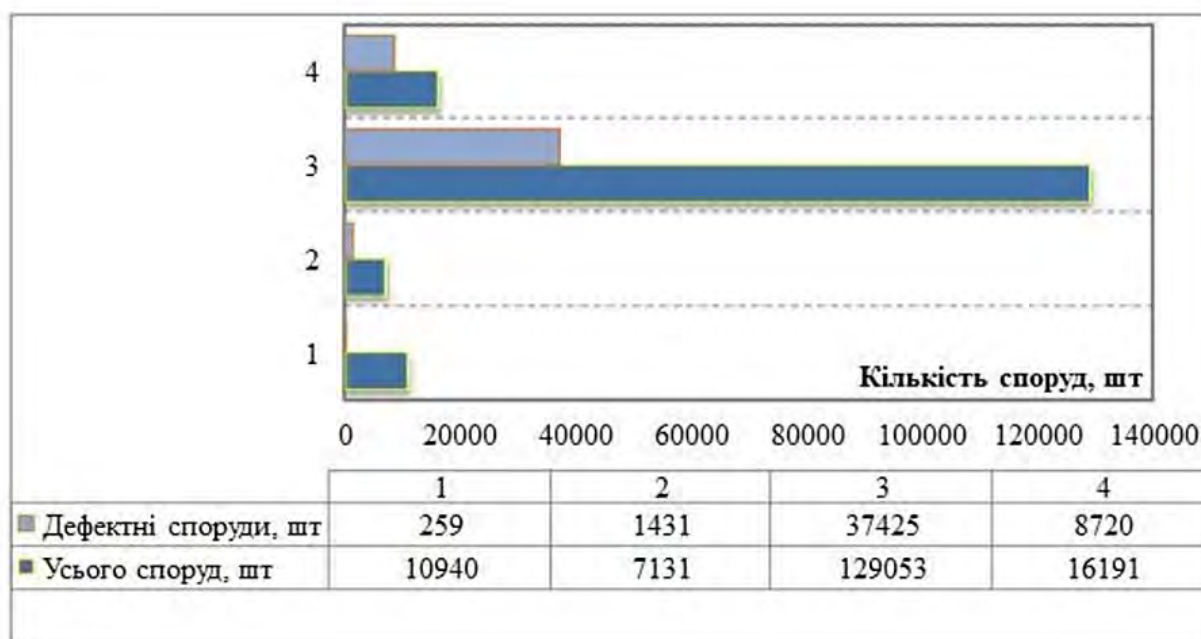
Конструкції працюють разом із ґрунтом засипки, що дозволяє приймати всі види дорожніх і залізничних навантажень. Стійкість самої легованої сталі у сукупності з якісним оцинкуванням і додатковим (за необхідністю) захистом від корозії з полімеру дозволяє досягти терміну служби до 100 років.

За останні роки в нашій країні дуже гостро стала проблема погіршення стану транспортних споруд. Це зумовлено фізичним зносом та старінням матеріалів і конструкцій, впливом навколишнього середовища, неналежним експлуатаційним утриманням, підвищенням осьових навантажень та швидкостей руху сучасного транспорту. Згідно з даними Аналітичної експертної системи управління всього на дорогах загального користування обліковується 16155 мостів, з них на дорогах державного значення – 5845 мостів, на дорогах місцевого значення – 10310 мостів. [1, 2]

Згідно із статистичними даними [1], акціонерним товариством АТ «Укрзалізниця» станом на 01.01.2019 р. експлуатується близько 7 тис. мостів, 90 шляхопроводів, 251 пішохідний міст та 10940 водопропускних труб. Водночас різного роду дефекти мають понад 2,5 тис. споруд, або 14,3 % від загальної кількості. 1431 залізничний міст має несправності, що складає 20,5 %



(рисунок 1). Близько 259 водопропускних труб є дефектними та потребують негайного капітального ремонту.



1, 2 – водопропускні труби та мости відповідно на залізницях України;

3, 4 – водопропускні труби та мости відповідно на автомобільних дорогах України

**Рисунок 1 – Розподіл мостів та труб за видами транспорту [1]**

Виходячи з вищесказаного та спираючись на світовий досвід проектування та будівництва штучних споруд, можна припустити, що для підвищення несучої здатності аварійних транспортних споруд на залізничних та автомобільних дорогах України доцільно застосовувати гофровані металеві конструкції.

### 12.1. Огляд ґрунтозасипних споруд із металевих гофрованих конструкцій

Перші конструкції з металевих гофрованих листів для будівництва водопропускних та інших підземних споруд почали застосовуватися з 1875 року [4]. На теперішній час накопичено значний світовий досвід будівництва та експлуатації металевих гофрованих конструкцій (МГК), які знаходяться під насипами залізничних та автомобільних доріг у вигляді водопропускних труб чи



малих мостів [5, 6]. Досвід експлуатації труб із МГК у період із 1875 р. по 1912 р. виявив їх низьку експлуатаційну надійність [1], а саме: значна частина труб отримала пошкодження у вигляді випучування частини конструкції всередину труби, тому на пострадянському просторі будівництво МГК було призупинено. Натомість у загальній світовій практиці такі конструкції продовжували застосовувати, усуваючи певні недоліки та вдосконалюючи технологію будівництва. Тому у 60-х роках ХХ сторіччя виробництво металевих конструкцій з гофрованих листів відновилося.

Гофровані водопропускні труби масово застосовувалися при будівництві БАМу, проте порушення технології будівництва призвело до появи великих деформацій, що вплинуло на введення заборони на застосування металевих гофрованих конструкцій з гофрами 130×32 мм на головних коліях залізниць. У зв'язку з цим проектні інститути перестали застосовувати типові рішення та остаточно втратили досвід проектування, а будівельники – безцінний досвід будівництва цих споруд. Наприкінці 90-х років ХХ століття було відновлено активне будівництво та реконструкція автомобільних доріг та залізниць. На цей момент стало можливим застосування зарубіжних конструкцій та їхнього величезного досвіду, накопиченого більш ніж за 100 років зведення та експлуатації гофрованих труб. Зарубіжними виробниками був розроблений та освоєний цілий ряд видів гофри, що відрізняються за міцністю, жорсткістю та довговічністю. Цей досвід дозволив суттєво розширити спектр застосування, збільшити отвори та несучу здатність споруд [37]. Стало можливим влаштовувати малі мости, замінюючи цим мостові переходи естакадного типу. З'явилися альтернативні конструкції шляхопроводів.

На даний момент масове поширення оболонки із металевих гофрованих листів відстежується у США, Канаді, Японії, Франції, Італії, Польщі та Скандинавських країнах [7,8]. Зводяться споруди з МГК як у північних країнах (Канада, Аляска, Норвегія, Фінляндія), і в умовах Африки, Азії. Серед відомих організацій, які проводять дослідження, розробляють та удосконалюють технології будівництва гофрованих конструкцій, нормативну документацію,



виготовляють ГСК і впроваджують інноваційні рішення, є Національна асоціація гофрованих сталевих труб (NCSPA) (у Сполучених Штатах) та Інститут гофрованих сталевих труб (CSPI) (у Канаді) [31, 32]. Ще 10-12 років тому максимальні значення прольотів для споруд з металевих гофрованих конструкцій становили трохи більше 6-7 метрів. Сучасний рівень розвитку даної галузі дозволяє будувати мости та тунелі прольотом 20 і більше метрів: 20,67 м – міст у Бистриці, Словаччина; 23 м – скотопрогін над дорогою у Південній Кореї; 24 метри – міст над річкою Шевіот в Альберті, Канада та інші [9, 30] (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Ґрунтозасипні тунельні конструкції з гофрованих елементів (NCSPA). URL: <https://www.ncspa.org/steel-product/plates/steel-structural-plate/>**

Починаючи з 2010 р. в Україні також почали будувати транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій. Перша транспортна споруда із МГК під залізницею побудовано на ділянці Вадул – Сирет – Держкордон регіональної філії АТ Укрзалізниця (рисунок 3) [10].

Металеві гофровані штучні споруди, що постачаються та виготовляються в Україні компанією “ViaCon Україна“, поступово набирають популярності і на сьогодні по країні їх змонтовано вже близько 5000: від невеликих труб-водопропускників та до величезних тунелів для пропуску авто- та залізничного транспорту, арочних мостів над річками, бункерів та сховищ (рисунки 4-9) [12].





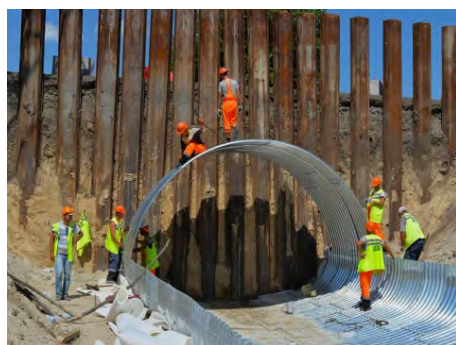
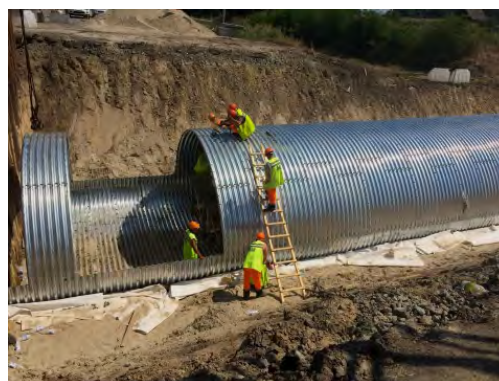
**Рисунок 3 – Перша труба із МГК на ділянці  
Вадул – Сирет – Держкордон Львівської залізниці**



Параметри конструкції:  
ширина - 5,0 м  
висота - 2,48 м  
довжина конструкції 36,99 м  
стінка 5,0 мм

2012 рік

**Рисунок 4 – Пішохідний перехід лінією швидкісного трамваю  
(м. Київ) (Арка Multiplate V-16)**



Параметри конструкції:  
ширина: 5,88 м,  
висота: 3,76 м,  
довжина конструкції: 45,99 м,  
товщина металу: 6,0 мм

2014 рік

Конструкція збиралася в два етапи. Зібрали підлогу труби, обсіпали, пустили рух, потім збирали другу частину СМГК.

**Рисунок 5 – Скотопрогін та місцевий проїзд автомобільною дорогою  
Київ – Харків – Довжанський км 133+00 (СМГК Multiplate MP150 L54)**



Параметри конструкції:  
 висота – 4,242 м  
 ширина – 8,648 м  
 довжина внизу – 2 x 78,562 м  
 товщина стінки – 7 мм

2007 рік

**Рисунок 6 – Двоочкова арка на обході смт. Бобринець.  
 Кіровоградська область (СМГК SC – 68R)**



Параметри конструкції:  
 ширина – 13,12 м;  
 висота – 8,83 м;  
 довжина – 41,98м.  
 кут перетину з а/д 65 °  
 розмір гофру 140 x 380 мм.  
 товщина стінки металу 7 мм.

Конструкція збудована з вертикальними зрізами. Портальні стінки і відкосні крила з габіонних конструкцій. Конструкція розрахована під автомобільне навантаження НК-100

2015 рік



**Рисунок 7 – Транспортний тунель на км 228+160 а/д Київ – Харків –  
 Довжанський (СМГК SUPERCOR 87S)**





Параметри конструкції:  
 ширина: 13,12 м  
 висота: 8,86 м  
 довжина конструкції: 75,514 м  
 товщина сталі: 7,0 мм

2007 рік

Конструкція збиралася в два етапи. Зібрали підлогу труби, обсіпали, пустили рух, потім збирали другу частину СМГК.

**Рисунок 8 – Транспортний тунель на обході м. Одеса (СМГК SUPERCOR SC 87S)**



Параметри конструкції:  
 розмір гофру - 200 x 55 мм  
 висота – 3,53 м  
 ширина - 5,89 м  
 довжина – 26,19м  
 товщина стінки – 6,25 мм

Стандартне двостороннє гаряче-цинкове покриття - 85 мм  
 Додаткове епоксидне покриття лотка - 200 мм

**Рисунок 9 – Реконструкція (гільзування) мостового переходу на а/д Київ – Луганськ – Ізварино (СГМК МР200 РА/14)**



З вищесказаного, на даний час в Україні з гофрованих листів збираються водопропускні труби, ґрунтозасипні мости, шляхопроводи, транспортні розв'язки, тунелі дрібного закладення, галереї, скотопрогони, підземні пішохідні переходи та інші підземні конструкції.

## **12.2. Основні види та форми металевих гофрованих конструкцій та області їх застосування**

Сучасний розвиток промисловості, здатної виробляти гофровані листи з різними геометричними характеристиками, дозволило значно розширити область застосування МГК протягом останніх 20 років. В даний час з гофрованих листів можуть збиратися водопропускні труби, ґрунтозасипні мости, шляхопроводи, транспортні розв'язки, тунелі дрібного закладення, галереї, скотопрогони, підземні пішохідні переходи та інші підземні конструкції.

За видами поперечного перерізу, споруди з гофролистів можна розділити на замкнені та незамкнені. Проліт споруд із замкненим поперечним перерізом нині досягає 15 м; проліт конструкцій незамкненого перерізу може становити до 30 м і мати стрілу підйому до 12 м.

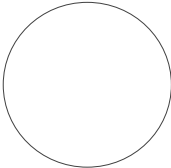
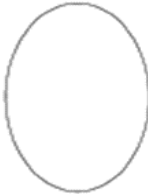






Для різних видів споруд доцільно застосувати гофровані конструкції різного типу. Типи конструкцій та області їх застосування представлені у таблиці 1. З таблиці можна зробити висновок, що у разі замкненого контуру застосовуються труби кругової, еліптичної та поліцентричної форми (рисунок 10).

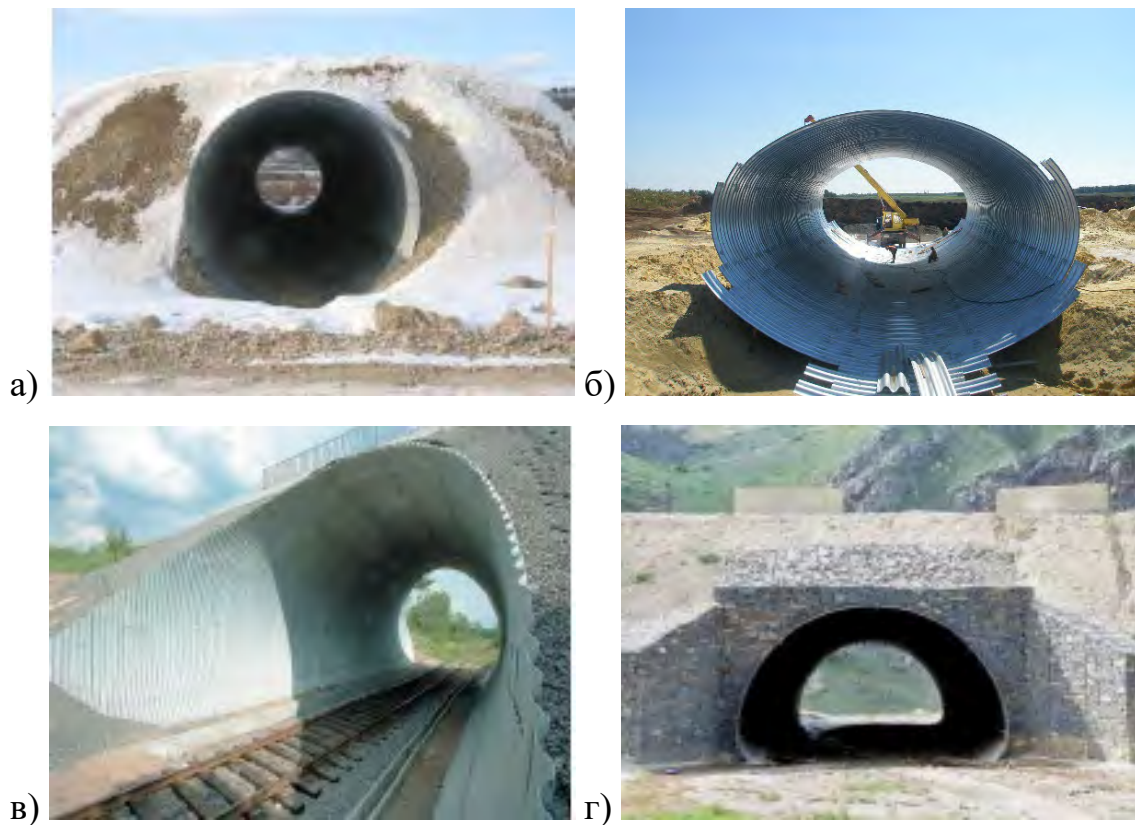
Кругові оболонки діаметром від 0,7 м до 15 м зазвичай застосовуються в транспортному будівництві для пропуску води, каналізаційних стоків та комунікацій. Мають діаметр постійного значення. Горизонтально-орієнтовані конструкції еліптичної форми прольотом від 1,6 м до 15 м застосовуються при низьких насипах. Співвідношення верхнього (або нижнього) радіусу до бокових приймається меншим чи рівним 4. Допускається проектування несиметричних





**Таблиця 1 – Основні типи металевих гофрованих конструкцій та області їх застосування**

№ п.п.	Контур	Ескіз	Проліт	Область застосування
1	Круговий		0,15 – 7 м	Водопротікані дорожні труби, комунікаційні та інші тунелі
2	Вертикальний еліпс		1,5 – 6 м	Водопротікані дорожні труби (пропуск різних по висоті рівнів води), комунікаційні тунелі
3	Горизонтальний еліпс		3 – 9 м	Водопротікані дорожні труби (обмеження по висоті насипу)
4	Поліцентричний контур		1,5 – 12 м	Водопротікані споруди та шляхопроводи, пішохідні тунелі
5	Кругова арка		2 – 13 м	Ґрунтозасипні мости та шляхопроводи
6	Арка підвищеного профілю		6 – 15 м	Ґрунтозасипні мости та шляхопроводи (високий габарит)
7	Арка зниженого профілю		6 - 15 м	Ґрунтозасипні мости та шляхопроводи (обмеження по висоті насипу)
8	Квадратний (полігональний)		3 – 8 м	Ґрунтозасипні мости та шляхопроводи



а) круговий контур; б) горизонтально-орієнтований еліпс;  
в) вертикально-орієнтований еліпс; г) поліцентричний

### Рисунок 10 – Металеві гофровані конструкції замкнутого контуру різної форми

еліпсів. Вертикально-орієнтовані конструкції еліптичної форми прольотом від 2,3 м до 6,1 м використовуються для пропуску води за значної різниці її розрахункових рівнів у часі протягом року. Відношення верхнього (або нижнього) радіуса до бокових приймається рівним 0,8, відношення висоти перерізу до її ширини приймається більшим 1, але меншим/рівним 1,2.

Поліцентричні труби прольотом від 2 м до 13 м застосовуються як водопропускні споруди при невисокому рівні води, а також як транспортні або пішохідні тунелі та підземні переходи. Співвідношення верхнього радіуса до бокових приймається меншим або рівним 5,5, відношення нижнього радіусу до бічних приймається меншим чи рівним 10. Всі конструкції замкнутого перерізу не потребують влаштування фундаментів – вони спираються на подушку з



дренуючого ґрунту і пошарово засипаються із ущільненням кожного шару. Безумовно, цей фактор є важливою перевагою таких конструкцій.

Незамкнені оболонки з МГК можуть мати форму арки прямого кругового контуру (кут основи приймається в межах від 160 до 195° включно), дворадіусної арки зниженого обрису та дворадіусної арки підвищеного контуру. Також, у деяких випадках, використовуються коробчасті конструкції (рисунок 11).

Незамкнені споруди прольотом до 20 м і більше застосовуються в якості ґрунтозасипних мостів, тунелів, скотопрогонів, галерей та пішохідних переходів. Форма конструкції вибирається залежно від конкретних умов, таких як висота засипки та забезпечення пропускних габаритів. Для споруд незамкненого контуру необхідно влаштування фундаментів, тип яких призначається виходячи з інженерно-геологічних умов. Засипка проводиться пошарово з ущільненням кожного шару.



а) кругова арка; б) арка пониженого контуру;

в) арка підвищеного контуру; г) оболонка коробчастого контуру

**Рисунок 11 – Металеві гофровані конструкції незамкненого контуру різної форми**





Найбільш ефективними формами споруд є: кругла труба (при її діаметрі до 3 м) та правильна кругова незамкнена арка (застосовується при прольоті до 20 м та більше).

### **12.3. Характерні дефекти та пошкодження металевих гофрованих конструкцій**

Металеві гофровані конструкції, що експлуатуються під насипами автомобільних та залізничних доріг, як і інші транспортні споруди, піддаються впливам багатьох шкідливих чинників. Негативну роль відіграють: агресивне середовище, з яким контактує споруда; значна величина та складний характер навантажень від рухомого складу, що включає також і динамічну складову; вплив водного потоку, який особливо значно проявляє себе при звуженні отвором споруди русла водотоку в період осіннього та весняного паводків. Для МГК, що виконують функцію водопропускних споруд, а також для будь-яких інших споруд, збудованих з метою подолання водних перешкод, характерні всі види дефектів та ушкоджень, спричинені впливом водного потоку: підмиви та розмиви конструкцій, пошкодження берегоукріплювальних та руслоукріплювальних конструкцій, пошкодження, спричинені льодоходом, утворення льоду, замулювання та засмічення отвору труби. Для МГК, що виконують функцію шляхопроводів, ушкодженнями, що зустрічаються найчастіше, є пошкодження, спричинені ударами негабаритів.

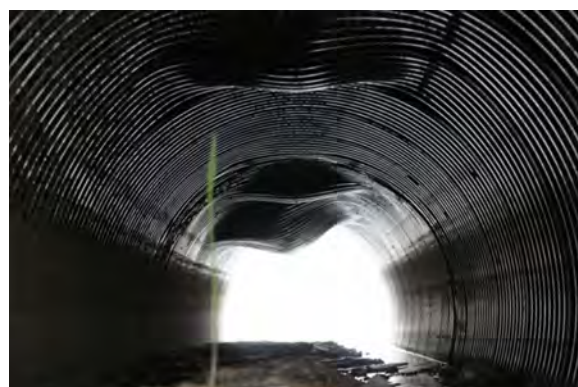
Дефектами та ушкодженнями, характерними саме для металевих гофрованих конструкцій, є всілякі деформації гофрованої оболонки споруд. До подібних дефектів та ушкоджень відносяться: прогини; овалізації тіл споруд (симетричні та несиметричні, у поздовжньому та в поперечному напрямках); місцеві деформації оболонки МГК (вм'ятини тощо).

Характерною особливістю МГК є їхня гнучкість. Як правило, навіть при значних перевантаженнях конструкцій під дією навантажень, що перевищують

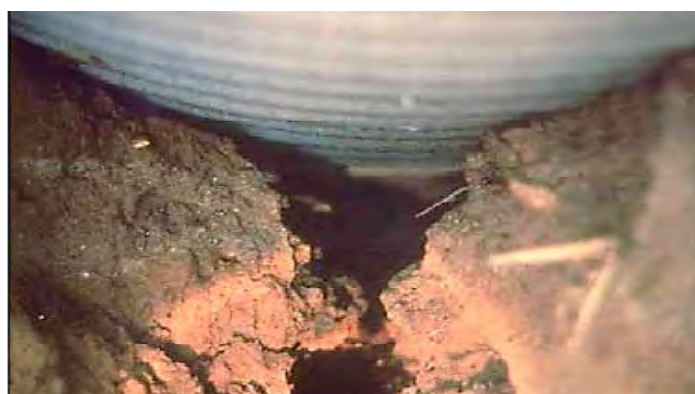


проектні, споруди даного типу не руйнуються, а втрачають проектну геометрію, зберігаючи загалом свої експлуатаційні характеристики. Однак, незважаючи на це, наслідки втрати форми споруди негативно позначаються як на експлуатаційних властивостях ділянки дороги, до складу якої входить споруда (поява ям у полотні дороги над трубою), так і на довговічності споруди (поява прогинів, що сприяє застою води у споруді, поява залишкових напружень та інше) [4, 13, 14, 18, 33, 34].

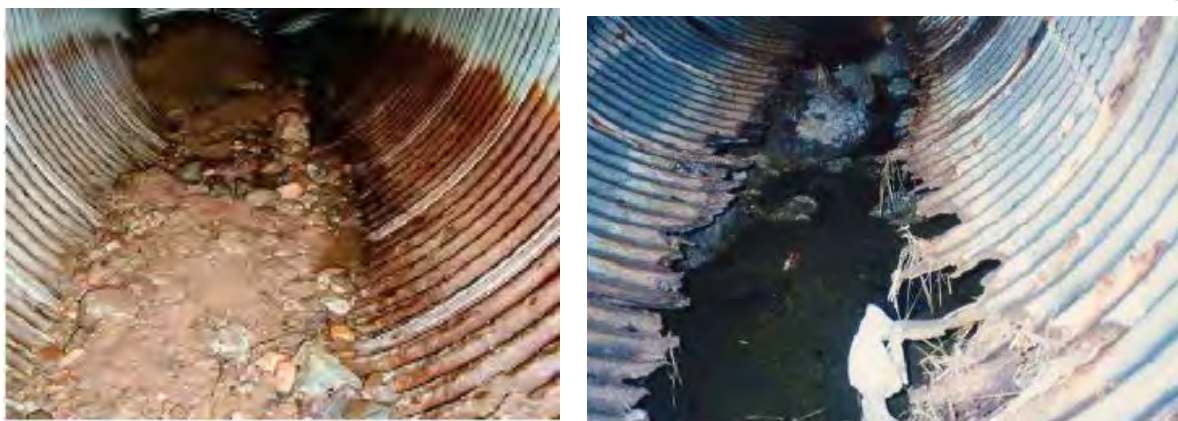
До найпоширеніших типів дефектів та пошкоджень МГК можна віднести: деформації, що перевищують проектні, внаслідок перевантажень конструкцій (рисунок 12); корозійні ушкодження, характерні для лоткової частини конструкцій (рисунок 15); вимивання ґрунту з пазух ґрунтового конверту навколо конструкції (рисунок 13). До менш поширеного відноситься абразивне зношування (рисунок 14).



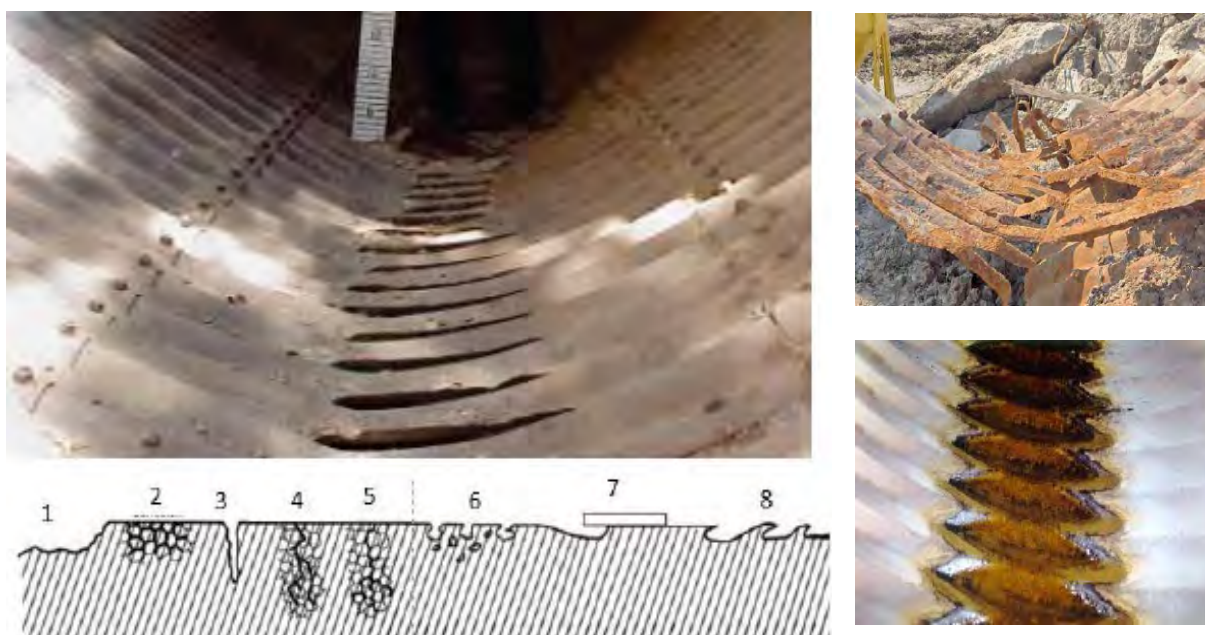
**Рисунок 12 – Деформації гофрованих листів МГК**



**Рисунок 13 – Вимивання ґрунту з ґрунтового конверту навколо МГК**



**Рисунок 14 – Наскрізні пошкодження лоткової частини МГК внаслідок абразивного зносу**

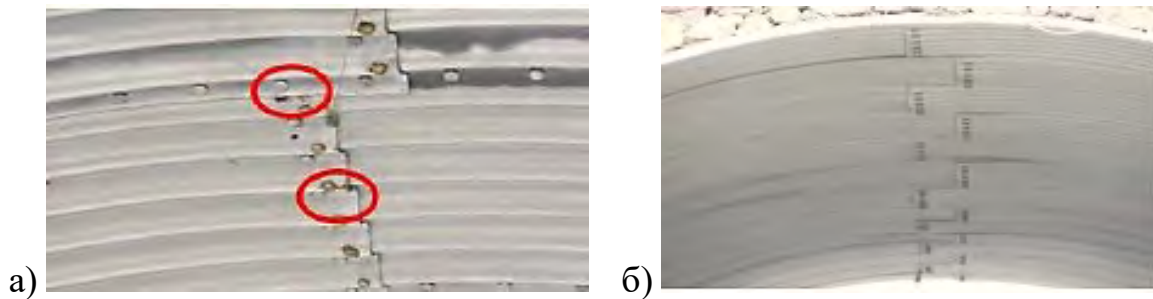


1 – загальна корозія; 2 - міжзерниста корозія; 3 - викришування; 4 - раптова корозія викришування міжзерниста; 5 - раптова корозія викришування внутрішньозерниста; 6 - місцеве вилуговування; 7 – ущелина; 8 - корозія під впливом швидкості потоку

**Рисунок 15 – Внутрішня та наскрізна корозія МГК. Схема розвитку корозії**

Крім того, у процесі експлуатації споруд із МГК зустрічаються дефекти у вигляді викришування металу біля болтових з'єднань (рис. 1.16, а) та провисання склепіння труби (рисунок 16, б).





**Рисунок 16 – Викришування металу у зоні болтових з'єднань (а)  
та деформування склепіння труби із МГК (б)**

Втрата форми споруди негативно позначається як на експлуатаційних властивостях ділянки залізничної колії чи автомобільної дороги (поява нерівностей на покритті автомобільної дороги або на залізничній колії над металевою гофрованою конструкцією), так і на її довговічності. Для збільшення довговічності металевих гофрованих конструкцій застосовуються додаткові покриття, що забезпечують її захист (таблиця 2).

**Таблиця 2 – Додатковий термін служби МГК із захисним покриттям**

Покриття	Термін служби МГТ, роки
Асфальтове	10
Асфальтобетонне	30
Внутрішня поверхня труби з покриттям із полімеризованого асфальту	45
Попередньо нанесений полімер	80
Попередньо нанесений полімер з бетонуванням	80
Попередньо нанесений полімер на внутрішню поверхню труби з полімеризованого асфальту	80
Асфальтове покриття, армоване волокном	40
Бетонування асфальту з додаванням армованого волокна	50
Підкладка з високоміцного бетону	75
Гладкий бетонний лоток по дну – покриття товщиною 75 мм над гофрою	80



За результатами аналізу пошкоджень МГК можна зробити висновок, що даний тип конструкцій дуже вимогливий як до якості проектування, так і до якості будівництва. Найбільш імовірною причиною появи пошкоджень силового характеру є недотримання технологічного циклу при будівництві конструкцій, зокрема, недостатньо ретельне ущільнення ґрунтової обійми. Також МГК схильні до впливів різних агресивних середовищ. Як і для будь-яких інших металевих конструкцій, вкрай актуальне питання ефективного антикорозійного захисту конструкцій, а також розрахунку довговічності, який би враховував вплив агресивних середовищ, а також роботу антикорозійних покриттів у часі.

#### **12.4. Найпоширеніші методи розрахунку металевих гофрованих конструкцій**

Споруди з металевих гофрованих елементів відрізняються від інших підземних конструкцій тим, що є гнучкими. На відміну від жорстких конструкцій, які повністю сприймають навантаження від ґрунту та транспортних засобів, гнучкі конструкції реалізують повною мірою ідею спільної роботи системи «оправа - ґрунтовий масив».

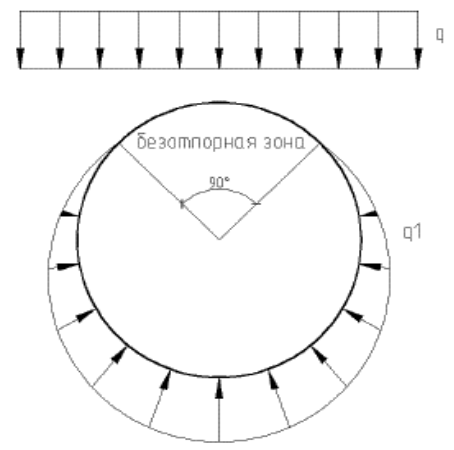
В основному методи розрахунку МГК [15-21], що використовуються в даний час, можна розділити на три основні групи:

- методи, спочатку розроблені для проектування тунелів та згодом адаптовані до розрахунку гофрованих конструкцій;
- методи, які використовують апарат теорії суцільного середовища;
- чисельні методи розрахунку (МКЕ, МКР і т.д.).

Методи, що застосовуються для розрахунку тунелів, ґрунтуються на визначенні зусиль у конструкції під впливом навантажень, що прикладаються до неї. Для розрахунку оболонки МГК необхідно визначити діючі на неї постійні та тимчасові навантаження. Далі розрахунок зводиться до застосування різних методів будівельної механіки, наприклад методів сил та переміщень, а також



методів механіки ґрунтів, як правило, засновані на гіпотезі Фусса-Вінклера. Методи розрахунку МГК поділяються на прості, при застосуванні яких не враховується пружна робота ґрунтової обойми, при цьому вертикальне навантаження від рухомого складу та ґрунту засипки врівноважується таким самим за величиною навантаженням, прикладеним у рівні лотка; та методи, що враховують пружну роботу ґрунту спільно з роботою оболонки (оправи) споруди як «вінклерова» основа. Одним із даних методів є метод розрахунку О.Є. Бугайової. Суть методу О.Є. Бугайової полягає в тому, що замкова частина кільця оправи тунелю вважається безвідпірною зоною, на яку діє тільки навантаження від вищележачого ґрунтового масиву, а рівень опору навколишнього ґрунту поступово збільшується від межі безвідпірної зони до лотка тунелю (рисунок 17).



$q$  - вертикальне навантаження,  $q_1$  - пружний опір ґрунту

**Рисунок 17 – Розрахункова схема кругових оболонок (оправ)  
за методом О.Є. Бугайової**

Згинальні моменти в оправі за методом О.Є. Бугайової визначаються (1-4):

$$M_{00} = 0,25 \cdot qr^2(1 - 0,056n); \quad (1)$$

$$M_{01} = \xi_0 \cdot M_{00}; \quad (2)$$





$$n = \frac{1}{0,06416 + \frac{EI}{kr^4}} = \frac{1}{0,06416 + \frac{E}{12kr} \left(\frac{\delta}{r}\right)^3}; \quad (3)$$

$$\xi_0 = 1 - 0,056n. \quad (4)$$

де  $M_{00}$  – момент у замку оправи;

$M_{01}$  – момент у лотку оправи;

$k$  – коефіцієнт постелі;

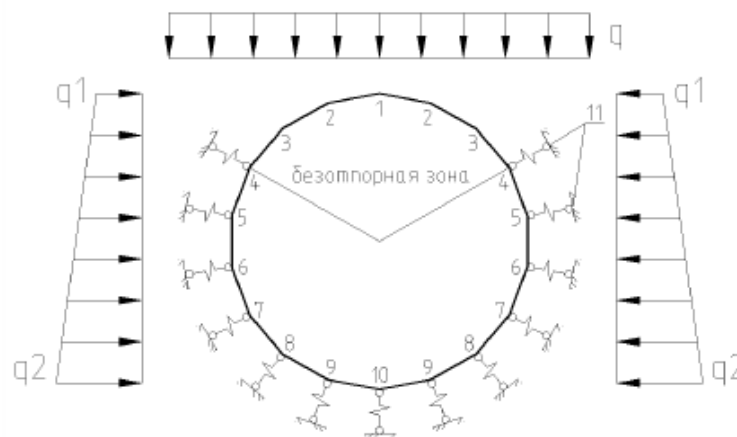
$q$  – інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження;

$r$  – радіус кільця оправи;

$E$  – модуль пружності матеріалу споруди;

$I$  – момент інерції поздовжнього перерізу стінки на одиницю довжини споруди.

Іншим методом, який дозволяє розраховувати підземні споруди, є метод «Метропроекту». Суть методу полягає у заміні криволінійного обрису оболонки (оправи) ламаним, заміні суцільного рівномірно розподіленого навантаження зосередженими силами у вузлах, а пружного середовища ґрунтового масиву – пружно-податливими опорами, розташованими по всіх вершинах багатокутника в передбачуваній зоні пружного опору ґрунту (рисунок 18).



$q$  – вертикальне навантаження,  $q_1, q_2$  – горизонтальні навантаження від ґрунту;

1-10 – розрахункові вузлові точки оболонки (оправи); 11 – пружно-податливі опори

**Рисунок 18 – Розрахункова схема кругових оболонок (оправ)**

**за методом «Метропроекту»**



Метод «Метропроекту» реалізує стержневу систему, кожен елемент якої характеризується згинальною жорсткістю  $EI$  та площею поперечного перерізу  $F$ . Ґрунтовий масив представлений пружно-податливими опорами, які не сприймають зусилля розтягування. Жорсткість пружно-податливих опор дорівнює  $ks$ , де  $k$  – коефіцієнт постелі ґрунту;  $s$  – середня довжина сусідніх стержневих елементів конструкції. Основна система утворюється шляхом введення шарнірів у всіх вершинах багатокутника, розташованих у зоні пружного опору ґрунту. До даних вершин прикладаються невідомі парні згинальні моменти, які визначаються шляхом розв'язання системи канонічних рівнянь (5).

$$\begin{aligned}
 M_1 \delta_{11} + M_2 \delta_{12} + \dots + M_n \delta_{1n} + \Delta_{1p} &= 0 \\
 M_1 \delta_{21} + M_2 \delta_{22} + \dots + M_n \delta_{2n} + \Delta_{2p} &= 0 \\
 M_1 \delta_{31} + M_2 \delta_{32} + \dots + M_n \delta_{3n} + \Delta_{3p} &= 0 \\
 &\dots\dots\dots \\
 M_1 \delta_{n1} + M_2 \delta_{n2} + \dots + M_n \delta_{nn} + \Delta_{np} &= 0.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Кожне переміщення в системі рівнянь (5) визначається за відомими з будівельної механіки формулами і складається з трьох членів, які враховують вплив деформацій вигину, обтиску стрижнів нормальними силами і осадку пружних опор (6):

$$\begin{aligned}
 \delta_{ik} &= \sum_{i=1}^n \int \frac{\overline{M}_i \overline{M}_k}{E_m J_m} ds + \sum_{i=1}^n \frac{\overline{N}_i \overline{N}_k}{E_m F_m} a_m + \sum_{i=1}^n \frac{\overline{R}_i \overline{R}_k}{D_m} \\
 \Delta_{ip} &= \sum_{i=1}^n \int \frac{\overline{M}_i M_p}{E_m J_m} ds + \sum_{i=1}^n \frac{\overline{N}_i N_p}{E_m F_m} a_m + \sum_{i=1}^n \frac{\overline{R}_i R_p}{D_m},
 \end{aligned} \tag{6}$$

де  $\overline{M}_i, \overline{M}_k$  – згинальні моменти в основній системі від дії одиничних моментів;

$\overline{N}_i, \overline{N}_k$  – нормальні сили в основній системі від дії одиничних моментів;



$M_p, N_p$  – відповідно, момент вигину і нормальна сила в основній системі від дії активних навантажень;

$\bar{R}_i, \bar{R}_k$  – реакції пружних опор в основній системі від дії одиничних моментів;

$R_p$  – реакції пружних опор в основній системі від дії активних навантажень;

$J_m, F_m, \alpha_m$  – відповідно, момент інерції, площа поперечного перерізу і довжина "m"-ої сторони многокутника;

$E_m$  – модуль пружності матеріалу оправи;

$D_m$  – характеристика жорсткості пружної опори.

$$D_m = K_m h_m b, \quad (7)$$

де  $K_m$  – коефіцієнт пружного опору ґрунту;

$h_m$  – довжина постелі пружної опори;

$b$  – ширина виділеної ділянки вздовж осі тунелю.

Розрахунок за методом переміщень є більш зручним і універсальним з точки зору програмування. Розрахункову схему призначають виходячи з основних припущень методу Метропроекту.

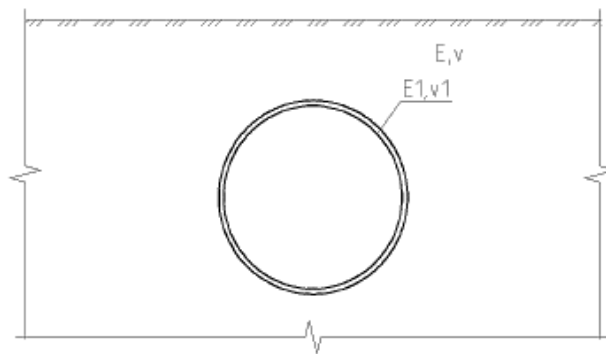
Метод «Метропроекту» та аналогічні йому наближені методи розрахунку стержньових систем в умовах дії пружного опору є найбільш функціональними для проектування підземних конструкцій. Перевагами даного методу є швидкість отримання результату, наочність напружено-деформованого стану конструкції, досить точна оцінка роботи оправи та ґрунту масиву. Недоліками методу "Метропроекту" є використання коефіцієнта пружного опору ґрунту для визначення жорсткості пружної основи та завдання безвідпірної зони.

Незважаючи на те, що фактично ґрунт є дискретним середовищем, для опису його властивостей успішно застосовується апарат механіки суцільного середовища. Критерії використання даного апарату було встановлено Н.М. Герсєвановим. У механіці підземних споруд масив ґрунту представляють у вигляді пружного напівпростору суцільного середовища. Суцільне середовище представляється у вигляді континууму, що заповнює певний об'єм. Основними





властивостями суцільного середовища  $\epsilon$ : суцільність, однорідність, ізотропність, деформованість. При застосуванні даних методів, розрахункова модель складається з напівпростору, обмеженого денною поверхнею та межами оболонки (рисунок 19). Ґрунт і оболонка (оправа) зазнають сумісних деформації без можливості відриву оболонки (оправи) від ґрунту. Основними характеристиками системи «оправа-ґрунтовий масив» є коефіцієнт загальних деформацій та коефіцієнт Пуассона.



$E, E_1$  – модулі деформації ґрунту та матеріалу оправи;  
 $\nu, \nu_1$  – коефіцієнти Пуассона ґрунту та матеріалу оправи

**Рисунок 19 – Розрахункова схема кругових оболонок (оправ) у масиві ґрунту (напівпросторі суцільного середовища)**

Зв'язок між переміщеннями середі в точці з координатами  $(x, y)$  та реактивним тиском  $P$ , який характеризує модель ґрунту як пружного, однорідного та ізотропного напівпростору, приймається у вигляді (9):

$$w = \iint_{-\infty}^{\infty} p(\xi, \eta) K(x - \xi; y - \eta) d\xi d\eta, \quad (9)$$

де  $K$  – деяке ядро перетворення, вид якого визначається рішенням задачі про завантаження напівпростору одиничною силою;

$\xi, \eta$  – приріст координат розрахункових точок.

Основною перевагою даного методу є можливість отримання полів напруження у масиві ґрунту, що оточує оболонку (оправу), а не тільки



напруження в ґрунті в зоні дії пружного опору, що характерно для методів О.Е. Бугайової та «Метропроекту». Це дає можливість проектувальнику наочно уявити утворення в масиві ґрунту полів напружень, виключаючи необхідність розраховувати навантаження на оболонку (оправу).

Розрахунок даними методами має складність, яка полягає в необхідності отримання розтягуючих напружень у ґрунті при деформації оболонки (оправи) всередину виробки під дією власної ваги ґрунтового масиву, так як немає можливості отримання безвідпірної зони. Усунення цього недоліку призвело до виникнення гібридних методів, особливість яких полягає в об'єднанні оболонки (оправи) споруди з ґрунтовим масивом за допомогою контактного шару. Також ускладнюючим розрахунок чинником вважають необхідність урахування накопичення напружень при врахуванні послідовності робіт із зворотної засипки споруди та отриманні розтягуючих напружень у ґрунті за оболонкою (оправою).

В останні кілька десятиліть, у зв'язку з розвитком комп'ютерної техніки, широкого поширення набули чисельні методи, які як МСЕ (метод скінченних елементів), МГЕ (метод граничних елементів) та гібридні методи. Найбільш поширеним на сьогодні є метод скінченних елементів – МСЕ [22-25].

МСЕ є результатом злиття матричних методів будівельної механіки та варіаційно-різницевих методів теорії пружності, він є універсальним методом вирішення дискретних завдань.

МСЕ – чисельний спосіб розв'язання диференціальних рівнянь. Він служить методом побудови математичної моделі та методом її дослідження. Основна ідея МСЕ полягає в тому, що безперервна (певна нескінченним числом значень) функція апроксимується дискретною моделлю. Дискретна модель будується на безлічі безперервних функцій, визначених на кінцевому числі підобластей. Безперервна величина може бути як векторною, так і скалярною, наприклад вектор переміщень.

За допомогою МСЕ можна проводити дослідження роботи конструкції на математичній моделі споруди. Модель є математичним поданням реального



об'єкта у масштабі 1:1 з отриманням об'ємного ефекту у разі вирішення просторового завдання.

Стосовно розрахунку металевих гофрованих конструкцій, система «оболонка – ґрунтова обойма» розраховується спільно, але на відміну від методів теорії пружності, оболонка споруди та ґрунтова обойма розбиваються на скінченні елементи, у вузлах яких відбувається передача зусиль. Для вирішення плоских завдань використовуються одно- і двовимірні скінченні елементи, для вирішення просторових задач – двох- та тривимірні елементи. Сучасні програмні комплекси, такі як ЛІРА, ANSYS, SCAD і т.п. дозволяють будувати скінченно елементні моделі конструкцій, як у плоскій, так і в просторовій задачі, враховувати геометричну нелінійність роботи конструкції та фізичну нелінійність роботи матеріалів.

Певною складністю при використанні програмних комплексів, які реалізують МСЕ, є моделювання ґрунтового масиву, так як ґрунт може мати нелінійність і консолідацію при тривалій дії навантажень. Окремим напрямком під час моделювання підземних споруд є створення контактних шарів, які могли б забезпечити відсутність розтягуючих напружень в скінченних елементах, що моделюють ґрунтовий масив. Також в цілому можна відзначити, що моделювання МГК методом скінченних елементів вимагає певної кваліфікації інженера, який виконує цю роботу. Від нього потрібні не тільки досвід та знання в галузі моделювання будівельних конструкцій у програмних комплексах (особливо конструкцій, що працюють у ґрунті), а й чітке розуміння роботи цих конструкцій, для запобігання появі грубих помилок.

Фактично, у сучасній практиці не розглянуто достатньо надійного методу, яким можна було б швидко перевірити вручну правильність розрахунку конструкції в програмі, як це можна зробити зі стержневими конструкціями. Все це часто призводить до того, що проектувальники відмовляються розробляти проекти МГК, віддаючи перевагу конструкціям, робота яких їм добре відома.



Але, як показує аналіз зарубіжної літератури, незважаючи на озвучені вище недоліки застосування МСЕ, даний метод фактично витіснив інші (особливо у сфері розрахунку середніх та великих МГК).

## 12.5. Конструктивні особливості аркових ґрунтозасипних споруд

На теперішній час вітчизняними виробниками випускається кілька видів гофри з різними параметрами хвилі та товщини листа. З них можна виділити:

– гофролист 34, довжина хвилі – 152,4 мм, висота – 34 мм, товщина листів 3-4 мм, використовується у спорудах діаметром до 3 м;

– гофролист 51, довжина хвилі – 152,4 мм, висота – 50,8 мм, товщина листів 3-6 мм, використовується в спорудах діаметром/прольотом до 7 м;

– гофролист 55, довжина хвилі – 200 мм, висота – 55 мм, товщина листів 3-7 мм, використовується у спорудах діаметром/прольотом до 7 м;

– гофролист 140, довжина хвилі – 381 мм, висота – 140 мм, товщина листів 4-7 мм, використовується у спорудах прольотом до 25 м.

Листи виготовляються з оцинкованої сталі та штамнуються на спеціальному устаткуванні, набуваючи синусоїдального вигляду хвилі та вигнутості відповідного радіусу (рисунок 20).

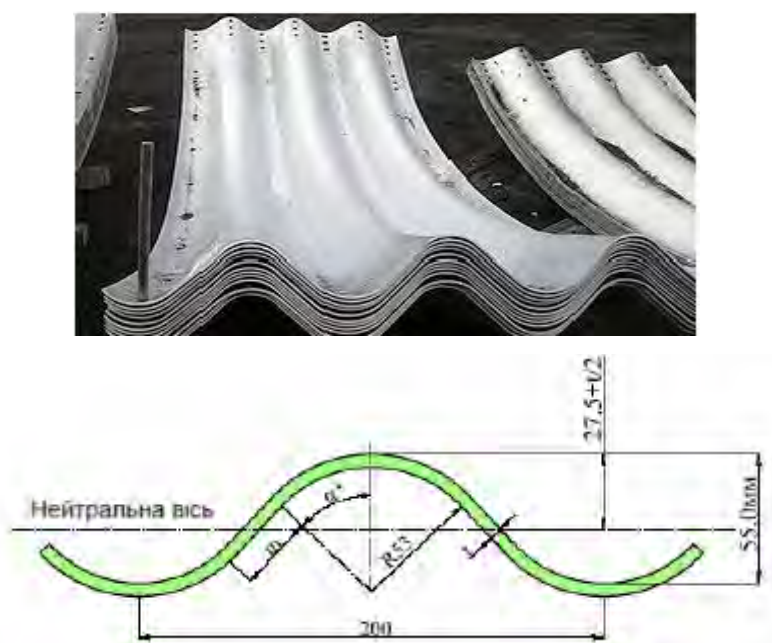


Рисунок 20 – Геометрія гофрованих листів 55





Марки сталі обираються за ДСТУ залежно від кліматичних умов району, в якому планується зведення МГК, забезпечуючи необхідну холодостійкість та клас міцності. Для захисту від корозії застосовується оцинкування товщиною покриття не менше 80 мкм. По краях гофролиста влаштовуються отвори для їх з'єднання згодом між собою болтами на будівельному майданчику. Застосовуються болти діаметром М16 та М20 класу міцності 8.8 зі сталей марки 45,50, які також захищаються від корозії шаром цинку завтовшки 16-30 мкм. При необхідності кількість болтових з'єднань на поперечній кромці листів може бути збільшено. Кількість болтів, потрібних для забезпечення міцності конструкції, визначається розрахунком. Приклад з'єднання гофрованих листів показано на рисунку 21.



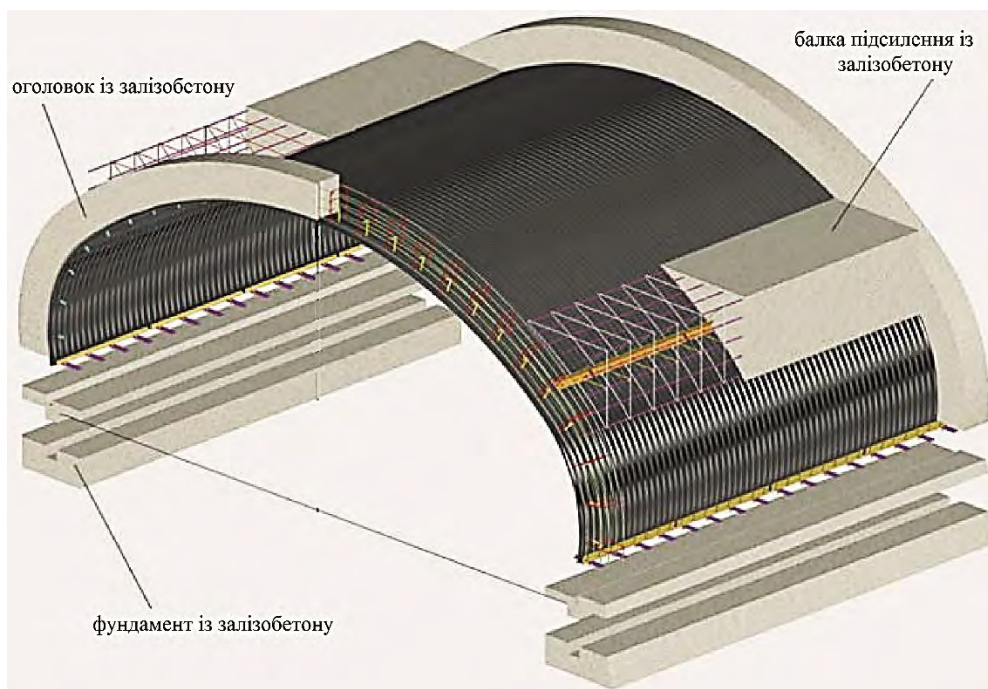
**Рисунок 21 – Приклад поєднання гофрованих листів між собою**

Таким чином, на об'єкт доставляється вже готовий комплект структурних елементів разом із необхідним кріпленням. Це зумовлює високу технологічність, швидкість та простоту складання споруди, оскільки всі складні процеси, що стосуються арочної конструкції, виконуються в заводських умовах. Споруди з МГК за потреби може бути підсилено кількома способами:

– влаштуванням жорстких залізобетонних ребер, що розміщуються в місцях головних напружень в арці, еліпсі чи поліцентрі (рисунк 22). Недоліком цього



підсилення є неможливість його застосування у сейсмічних районах через те, що воно порушує сумісну роботу конструкції з ґрунтом та руйнується при зміщенні опор, можливих при 9-ти бальних впливах [22].



**Рисунок 22 – Підсилення МГК залізобетонними балками**

– при великих прольотах та малій висоті засипки посилення виконується за рахунок горизонтальних конструкцій, що встановлюються у верхній частини засипки і мають високу жорсткість на вигин та розподіляють навантаження рівномірно над усією конструкцією склепіння (рисунок 23).



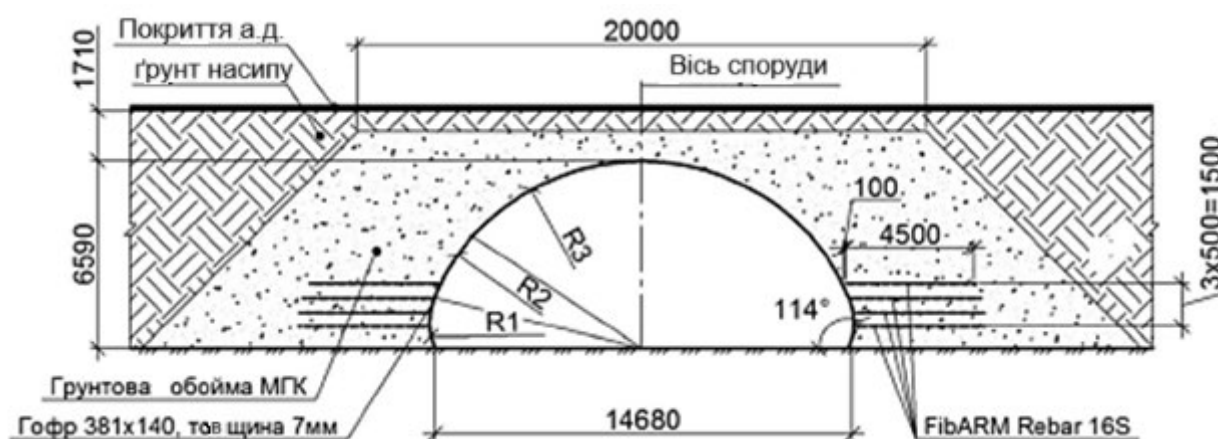
**Рисунок 23 – Підсилення МГК залізобетонними плитами**



– при високих насипах підсилення виконують встановленням додаткових гофрованих листів або бандажних кілець (рисунок 21).

– для підвищення міцності з'єднань може бути збільшена кількість болтових з'єднань в поперечному стику листів, або введені перехлести в один або більше кроків.

– підсилення полірадіусних металевих гофрованих арок армуванням ґрунтової обойми вуглепластиковими стрижнями FibARMRebar 16S. Згідно з розрахунками, даний метод у певних конкретних умовах є найефективнішим. Довжина стрижнів приймається 4,5 м, крок стрижнів за висотою – 0,5 м, поздовжній крок – 0,8 м. Стрижні розташовуються на відстані 100 мм від металевої оболонки в западинах гофри (рисунок 24).



**Рисунок 24 – Підсилення МГК армуванням ґрунтової обойми вуглепластиковими стрижнями FibARMRebar 16S**

Крім наведених конструктивних особливостей аркових ґрунтозасипних споруд, необхідно відмітити, що поведінка металевої гофрованої конструкції під навантаженням досить сильно залежить від ступеня ущільнення ґрунту в засипці, тому при будівництві слід особливу увагу приділяти забезпеченню однакового рівня ущільнення ґрунту для того, щоб отримати симетричну роботу гофрованої конструкції при симетричному навантаженні та виключити, чи хоча б зменшити ймовірність прояву несиметричного характеру деформування МГК.



## 12.6. Переваги гофрованих конструкцій

Якісні показники металевих гофрованих конструкцій приведено в таблиці 3.

**Таблиця 3 – Якісні показники металевих гофрованих конструкцій**

№	Оцінювальний показник	Параметри
1	Швидкість будівництва	Висока швидкість будівництва
2	Трудоемкість будівництва	У порівнянні з залізобетонними і бетонними в кілька раз нижча
3	Термін служби	Термін служби до 100 років. Низькі витрати на підтримку працездатності, окрім початкового періоду стабілізації ущільнення ґрунтової засипки
4	Важкість монтажу	Досить простий монтаж без використання спеціальної техніки. Монтаж можливий у будь-яку пору року
5	Маса споруди	Мають малу масу
6	Використання в особливих умовах	Мають високу міцність. Гнучкість труби дозволяє витримувати досить великі сейсмічні навантаження
7	Вартість	Будівництво транспортних споруд із МГК обходиться на 15...20 % дешевше, ніж будівництво з інших матеріалів. Крім цього, через невелику вагу конструкцій можлива доставка будь-яким видом транспорту

Підсумовуючи вищесказане, не дивлячись на вимогливість металевих гофрованих конструкцій, їх застосування у сучасному будівництві доцільно та має ряд переваг в порівнянні з залізобетонними трубами та малими мостами:

– Міцність. При порівняно малій товщині металу (2,8-7,0 мм) МГК мають високу міцність. Спільна робота конструкції та ґрунту засипки забезпечує сприйняття нерівномірних деформацій основи. МГК мають підвищену сейсмостійкість і опір до руйнування.





– Довговічність. Використання ефективних антикорозійних покриттів дозволяє підвищити стійкість МГК до агресивних середовищ і цим продовжити термін служби штучних споруд із МГК до 75 років і більше, тоді як залізобетонні конструкції служать трохи більше 25-30 років.

– Незалежність від клімату. Споруди з МГК можуть експлуатуватися у будь-яких кліматичних умовах. Використання різних марок сталей дозволяє застосовувати їх у районах з екстремальними температурами, таких як умови арктичного холоду та в країнах з тропічною спекою.

– Транспортабельність. Виготовлені в заводських умовах гофровані листи легко та компактно пакуються і їх можна транспортувати в будь-яке місце для складання споруд будь-яких розмірів, тоді як габаритні розміри залізобетонних споруд значно обмежені.

– Технологічність. Терміни будівництва споруд з МГК в 5-7 разів менше, ніж з бетонних конструкцій. При будівництві МГК не потрібне використання складної та дорогої техніки. Крім того, будівництво споруд із МГК можна робити у зимовий період.

– Економічність. Як показав досвід застосування МГК у дорожньому будівництві, витрати на спорудження об'єктів знижуються, порівняно з прямокутними залізобетонними трубами на 20-30 %, мостами – до 50 %. При будівництві у віддалених та північних районах варіант спорудження з МГК може виявитися єдиною можливістю. Крім того, однією з важливих відмінностей від традиційних конструкцій є значне зниження або повна відсутність матеріальних витрат за експлуатацію споруди.