

## МЕТАЛЕВІ НЕСУЧІ І ГЕРМЕТИЗУЮЧІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ПІДЗЕМНИХ ТА ЗАХИСНИХ СПОРУД

<sup>1</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

*Розробка нових технологій для будівництва захисних споруд багатофункціонального призначення відображає нинішню необхідність поліпшення заходів захисту цивільних людських і матеріальних ресурсів (та подвійного призначення) і підвищення обороноздатності за допомогою споруд, будівель, сховищ та укриттів. Для ґрунтовної оцінки відомих напрацювань по цій темі виконали огляд історії і досягнень у галузі виробництва і застосування металевих матеріалів і конструкцій у будівництві підземних та захисних споруд, проаналізували досягнення і недоліки. Основну увагу звернули на досвід крупнотоннажного виготовлення чавунних тубінгів на підприємствах колишнього СРСР, як найбільш близьких до сучасних часів масштабних виробництв з вагомими результатами, корисними для вивчення і удосконалення в конструкторському і технологічному напрямках. З шістдесятих років минулого століття на кріплення підземних споруд різного призначення, у тому числі й для захисних та спеціальних об'єктів, щорічно в колишньому СРСР вироблялося 25-40 тис. тонн чавунних тубінгів. Майже всі стволи Метробуду, багато стволів Міноборони та інших міністерств колишнього СРСР постійно використовували чавунні тубінги на своїх об'єктах. Для нинішнього часу виявлено необхідність і можливість інтенсифікації будівництва захисних споруд шляхом застосування у металевих матеріалів, зокрема високоміцних ливарних сплавів, передусім високоміцних чавунів, а також ресурсоефективних ливарних методів виготовлення будівельних та захисних сегментів чи тубінгів. Найбільш придатною технологією для такого виробництва тонкостінних легковагих металовиробів на нинішній час є ЛГМ-процес, який після удосконалень за останні десятиліття, в тому числі завдяки 3D-технологіям і адаптації до застосування новітніх сплавів, має потенціал для забезпечення росту будівництва як стаціонарних, так і мобільних захисних споруд.*

**Ключові слова:** захисні споруди; захисні конструкції; литі матеріали; тубінг; чавун; високоміцний чавун; лиття за моделями, що газифікуються.

### Вступ

Проблема розробки новітніх технологій для одержання захисних споруд багатофункціонального призначення відображає нинішню актуальну потребу удосконалення заходів захисту цивільних людських і матеріальних ресурсів (та подвійного призначення), а також збільшення живучості призначених для цього споруд, будівель, сховищ та укриттів. За Законом України [1], підписаним Президентом в серпні 2022 р., усі нові будівлі зі значним (СС3) і середнім (СС2) класами наслідків, у яких постійно перебуватимуть понад 50 осіб або періодично перебувають понад 100 осіб, а також інші об'єкти будівництва відповідно до переліку, визначеного Кабінетом Міністрів України, обов'язково матимуть захисні споруди цивільного захисту (сховища й протирадіаційне укриття) або споруди подвійного призначення (наземні або підземні будівлі/споруди). Нові бомбосховища мають з'явитись і в існуючій забудові, що дозволить створити в Україні мережу захисних споруд.

### Результати огляду та передумови нових технологічних розробок

Мета цієї статті полягає у проведенні аналізу технічної інформації по цій тематиці, зокрема у галузі таких збірних металевих захисних споруд, що мають тубінгові конструкції, оскільки такі несучі і герметизуючі конструкції у великій кількості вироблялись і зводились в колишньому СРСР і, зокрема, вагомий досвід поточного виробництва тубінгів протягом десятиліть накопичений на заводах України. Корисна на сьогодні інформація, передусім вітчизняний досвід і напрацювання, потрібні як аналоги і основа для розвитку технологій виготовлення металевих збірних захисних споруд, які на, думку авторів, мають значну перспективу з використанням нових ливарних і металообробних процесів.

Згідно з урядовим документом [2], на схемі (рис. 1) представлено типи захисних споруд, серед яких вирішальний корисний вклад належить підземним будівлям та спорудам, котрі можуть бути розділені на три великі групи: цивільного, виробничого та спеціального призначення. Тим не менш, величезна їх різноманітність (сьогодні відомо понад 40 напрямів використання підземного простору) і постійне вдосконалення, може мати більш детальну класифікацію [3].

За схемою (рис. 1) важливу захисну функцію виконує метрополітен та інші підземні споруди. Метрополітен, крім транспортної функції, завжди проектувався і призначався для захисту населення від впливу засобів ураження, високих температур і продуктів горіння, біологічних засобів, отруйних речовин, аварійно-хімічно небезпечних речовин. Споруди та пристрої метрополітену, що експлуатуються в мирний час у транспортному режимі, за потреби максимально використовуються в

режимі притулку для захисту та життєзабезпечення людей, що укриваються. Лінії метрополітену, що пристосовуються під притулки, як правило, проектується розділеними на дільниці, у кожній з яких передбачаються додаткові споруди та пристрої для забезпечення їх автономного функціонування. Ключовим захисним фактором захисної споруди є її герметичність разом з безвідмовною та якісною роботою фільтрів вентиляційних пристроїв.



Рисунок 1 – Типи захисних споруд для укриття населення [2].

Кріплення підземних споруд з сегментів – чавунне тьюбінгове кріплення в даний час є конструкцією, що відповідає всім вимогам, що пред'являються до конструкцій підземних споруд, в тому числі захисних: міцність, стійкість, надійність, водонепроникність (як основна вимога екологічної та експлуатаційної безпеки), ремонтпридатність, виключення похибок при складанні (технологічна надійність), мінімальні експлуатаційні витрати, можливість багаторазового застосування сегментів типу тьюбінгів (для тимчасових підземних споруд, наприклад, пілот-тунелів, робочих стовбурів (стволів), тимчасових виробок) [4].

Унікальною властивістю є вогнестійкість чавунних конструкцій – вкрай важлива умова безпеки експлуатації та самого існування споруд, а також ефективний опір сейсмічним та іншим ударним навантаженням ("живучість" підземної споруди). Також перспективні на основі болтової збірки тонкостінні конструкції з високоміцних сплавів мають потенціал як швидкого монтажу, так і використання в якості мобільних для релокації споруд у вигляді захисних модулів. Перелічені чинники визначили можливість повсюдного застосування чавунного кріплення, насамперед, у важких інженерно-геологічних умовах закладання тунелю чи іншої підземної споруди. У загальній вартості тунелів значну частину (близько 60 %) становить вартість чавунного кріплення [4].

Розглянемо деякі сторінки історії розвитку кріплення з чавунних тьюбінгів та перспективи його застосування у сучасному підземному будівництві на основі публікацій [3-10]. За письмовими даними у 1795 р. чавун вперше було використано для виробництва тьюбінгів, які було використано для ствола на шахті у місті Тайнсайд на півночі Англії [5]. У 1800 р. англієць Уайт отримав патент на використання стропил і покрівлі з чавуну, який раніше не застосовувався. На заводах Болтона та Уайта у м. Сохо (Англія) з чавуну виливали також підлогу та сходи. До середини 19 століття чавунне кріплення англійського типу з тьюбінгів забезпечувало бурхливий розвиток кам'яновугільної промисловості Великобританії, в якій було збудовано понад 250 шахт і вже в 1913 р. видобувалось 280 млн т вугілля, значну частку якого експортували [6].

З 1850 р. у Німеччині відбувається промислова революція, освоюються родовища кам'яного вугілля, рудні та калійні родовища. До кінця 19 століття в Німеччині, в Рейнсько-Вестфальському районі було

побудовано понад 89 стволів, з яких тьюбінговим кріпленням було закріплено понад 5524 м (в середньому 62 пог. м на ствол). У 1883 році була створена тьюбінгова колона з розчekanкою швів між тьюбінгами свинцевим дротом (доти шви розклинювали деревом) [6]. Вперше Ю. Риммером були розроблені чавунні тьюбінги, що механічно оброблялися по бортах, зі свердленням бортових отворів і з просвердленими тампонажними пробками. Ущільнення всіх елементів тьюбінгового кільця - стикових фланців, болтових з'єднань і тампонажних отворів виконували свинцем. Бочкоподібні шайби болтових з'єднань і тампонажних пробок ущільнювали за рахунок затягування свинцевих шайб болтами і пробками. Закріпний (зовнішній) простір укріплювали цементним розчином. Гідроізоляцію горизонтальних та вертикальних (механічно оброблених) фланців проводили «карбуванням» свинцевих прокладок, що після монтажу забезпечувало повну герметизацію внутрішньої частини тьюбінгової колони, ззовні покритої цементними тампонажними завісами.

На початку 20 століття складні гідрогеологічні умови в гірничодобувних районах Німеччини, утруднені майже суцільним заселенням території та щільною промисловою забудовою, що негативно впливало на деформацію поверхні під впливом гірничотехнічних факторів (просідання поверхні від осушення та водозниження в районі шахт), виявили серйозні недоліки існуючих конструкцій тьюбінгових кріплень стволів, які руйнувалися під дією поверхні, що просідає. У 1925-1927 рр. внаслідок втрати стійкості тьюбінгового кріплення зруйнувалися два нові шахтні стволи діаметром 6,5 м. Жорсткість кріплення була збільшена шляхом включення в спільну роботу з чавунним кріпленням залізобетону з 1958 р. методом проектування О. Домке для комбінованого чавунно-бетонного кріплення [6].

У 60-ті рр. минулого століття виникла необхідність розробки податливого кріплення, що було вирішено шляхом застосування при проходці ствола тимчасового кріплення, несуча здатність якого більша, ніж основного кріплення. Чавунне тьюбінгове кріплення в Німеччині замінили герметичним зварним сталобетонним кріпленням, що розраховували за методикою Х. Лінка, а як основний податливий елемент кріплення застосовували асфальтову оболонку, що оточує сталобетонне кріплення ззовні. Застосування такого кріплення обмежує внутрішній діаметр стовбура до 5-6 м, бо технологічно було можливо виготовляти внутрішню сталеву обичайку завтовшки не більше 80 мм, що зумовлювалося можливістю вальців.

Навпаки, в СРСР з 60-тих рр. минулого століття найширше застосували саме чавунно-бетонне кріплення. На кріплення шахтних стволів різного призначення, у тому числі й для захисних та спеціальних об'єктів, щорічно вироблялося 25-40 тис. т чавунних тьюбінгів [6]. Трест Шахтспецбуд на проходження найскладніших стволів щорічно витрачав близько 25 тис. т чавунних тьюбінгів. З 1965 р. цим трестом пройдено близько 2200 пог. м стволів із кріпленням чавунними тьюбінгами. Майже всі стволи Метробуду, багато стволів Міноборони та інших міністерств СРСР постійно використовували чавунні тьюбінги на своїх об'єктах.

Для кріплення стволів переважно використовувалися тьюбінги внутрішнім діаметром 6,5 м, 7,0 м, 7,5 м і 8,0 м. При цьому питання збереження стійкості кільця було вирішено теоретично та практично. Так, при широкому застосуванні чавунного тьюбінгового кріплення на гірських об'єктах, у тому числі і на осушуваних з можливим просіданням поверхні на 0,5-3,5 м, на практиці було забезпечено несучу здатність кріплення на вертикальні стискаючі навантаження, розроблено методи визначення цих навантажень, конструктивні рішення та заходи, що дають безпечність та герметичність кріплення. Проблему вертикальної податливості кріплення стволів було вирішено не шляхом розділу водонепроникного кріплення і масиву, що просідає, а вставленням вузлів податливості в тих пластах, де передбачалися в кріпленні напруги, близькі до граничної руйнівної.

Сьогодні технологія підземного будівництва накопичила досвід експлуатації облицьованих металевими тьюбінгами стволів (і захисних споруд) різного призначення в умовах агресивного впливу середовищ (води, що фільтрується через кріплення, чи соляного просипу всередині ствола тощо), впливу агресивного газу (сірководню), що дозволяє підходити гнучкіше до конструкції кріплення ствола в цілому. Якщо встановлюється термін служби ствола 120 років, то ця вимога практично завжди пред'являється лише до основного матеріалу кріплення – чавуну. При цьому скріплювальні елементи не обов'язково повинні мати такі властивості, бо в процесі експлуатації ствола нормами передбачено постійний нагляд за кріпленням і періодичну ревізію основних елементів кріплення, а у разі виходу елемента з роботи - заміну ущільнювальних шайб прокладок, певної кількості болтів чи пробок. Через 30-60 років майже на всіх спорудах відбувається перехід на нові умови експлуатації, часто із зміною функції призначення самого ствола, що водночас означає заміну чи ремонт армування ствола. За цей термін болтові сталеві елементи (гайки та різьби болтів) значною мірою руйнуються корозією, тому їм потрібна можливість заміни.

Конструкція кріплення повинна передбачати ремонт окремих елементів кріплення та заміну їх новими вузлами для захисту цієї конструкції від негативних впливів (наслідків відпрацювання шахтного поля або водозниження). Це забезпечують методи: герметичного зварювання; ущільнення герметизуючими елементами (прокладками та шайбами) шляхом їх деформування; затяжки в болтових з'єднаннях та пробках (тампонажних та заливальних); а також ущільнення карбуванням свинцю в нерухомих з'єднаннях (з'єднувальний шов між бортами тюбінгів) та ущільнення дерев'яними клинами з подальшим їх набуханням при залишковому просоченні води [6, 7]. Останній метод застосовували на початку історії застосування чавунних тюбінгів.

Хоч, привабливим здається застосування герметичного зварювання для ізоляції швів металевих несучих конструкцій, але при ретельному аналізі виявляється, що зварні роботи можна застосовувати для неглибоких стовбурів, не схильних до впливу зсувів і осаду поверхні від водозниження чи підземних розробок. З огляду на те, що корозія сталі 2-2,5 мм/рік, очевидно, що без спеціального захисту термін служби герметичного зварного шва дуже недовгий [6]. Крім того, у разі потреби шов не завжди можна переварити. Тому за майже рівної трудомісткості герметизації швів зварюванням чи карбуванням у складних гірських умовах частіше перевага надається карбуванню, насамперед із-за можливості виконання цієї роботи за будь-яких умов.

Ґрунтовний аналіз властивостей конструкцій в галузі захисту від корозії, безпеки конструкції, сприйняття додаткових навантажень при експлуатації, впливу вертикальних осадів при відпрацюванні шахтного поля чи подальшому розвитку осушення водоносних горизонтів, простоти та доступності ремонтних робіт, показує безперечні переваги чавунного кріплення перед сталевим [6, 7].

В роботі [8] фахівцями ливарниками докладно описано практику лиття на заводі колишнього СРСР чавунних тюбінгів-сегментів для великого кільця діаметром кілька метрів і шириною 1,0–1,5 м, у свою чергу з них збирають величезні підземні труби, де розташовують станційні чи інші приміщення, рейкові шляхи для руху вагонів, ескалатори тощо. Для будівництва метрополітену використовують кільця тунелів внутрішніми діаметрами 6 м для тунелю з одним шляхом і 10 м – для прокладання всередині тунелю двох колій.

Тюбінги виливають з чавуну, що стійкіший проти корозії, ніж сталь, оскільки під землею із зовнішнього боку тюбінгова труба може контактувати з підземними водами, що прискорює корозію металу. У СРСР виробництво тюбінгів почало розвиватися з 1932 р. з початком будівництва метрополітену. У цей період було розпочато виготовлення тюбінгів на Балтійському заводі у м. Ленінграді, на Уралмашзаводі в м. Свердловську, на заводі «Російський дизель» у м. Ленінграді, на Станколіті у м. Москві, на НКМЗ у м. Краматорську.

Аналізуючи американський досвід виробництва тюбінгів, автори [8] заключають, що тюбінги вищої якості отримували в сухих формах з піщано-глинистої суміші (ПГС-формах). Однак з огляду здешевлення виробництва і підвищення його продуктивності в США віддали перевагу сирій формі, хоча при цьому збільшувався брак лиття. В огляді [8] ґрунтовно описано відомі реальні технології виробництва тюбінгових сегментів у колишньому СРСР з фіксацією уваги передусім на технології формовки (виготовлення ливарної піщаної форми). Очевидно, ливарна технологія лише формовкою не обмежується, проте остання – головний компонент ливарної технології, що найбільш істотно впливає на якість вилівка та його економічність, а інші компоненти технології (виплавка металу, його заливка у форму, вибивання, фінішні операції) нічим суттєво не відрізнялися від загальноприйнятих на той час у ливарному виробництві.

За часів СРСР литі тюбінги виробляли приблизно на двадцяти заводах, серед них – 7 українських підприємств (у наведеному нижче переліку вказано тодішні назви заводів-виробників): НКМЗ, металургійний завод ім. Ілліча (м. Маріуполь), Запоріжсталь, КЦРЗ (м. Кривий Ріг), Криворіжсталь, металургійний завод ім. Г.І. Петровського (м. Дніпропетровськ), Дніпропетровський завод металургійного обладнання (ДЗМО). Розглянемо технології формування на цих та інших заводах у радянський період за матеріалами [4, 6, 8].

Найбільш повно і всебічно технологія виливання тюбінгів була відпрацьована на ДЗМО (нинішня назва ПАТ «Дніпроважмаш», м. Дніпро), де ця технологія існує в даний час, а тюбінговий є цех цілком спеціалізованим. Для формування нижніх ливарних півформ використовується ПГС, що складається з гусарівського піску, відпрацьованої суміші, водо-глинистої суспензії при загальному вмісті в ній глинистої речовини 13-15 %. Ця ПГС має  $\sigma_{сж} = 0,60-0,75$  кгс/см<sup>2</sup> та вологість 6,0-6,8 %. Щільність набивання форми визначається твердістю 80-85 од., що досягається 80-90 ударами струшувальної формувальної машини. Нижня півформа фарбується водною графітовою фарбою і підсушується теплом протягом 33 хв при температурі  $t = 100-120$  °С в перші 10 хв і 230-280 °С - в останні 10 хв. Така технологія сушіння забезпечує просушений шар глибиною 20 мм. Стрижні для утворення отворів

(«чобітки») виготовляють з ПГС, фарбують, висушують теплом та встановлюють в нижню півформу. Верхню півформу виготовляють з тієї ж ПГС, що й нижню, фарбують графітовою фарбою і збирають з нижньою. Форми для тюбінгів виготовляють на конвеєрі. Заливання форм проводять також на конвеєрі чавуном СЧ20 згідно з ГОСТ 1412-85 при  $t = 1270-1310$  °С.

Сьогоднішній вигляд тюбінгової продукції ПАТ «Дніпроважмаш» (<https://www.dts.dp.ua/>) показано на рис. 2.



Рисунок 2 – Чавунні тюбінги ПАТ «Дніпроважмаш»

На Дніпроважмаші нині застосовують також піщано-фуранову ливарну форму, яка дорожче (суміш з фурановою смолою у 13 разів дорожче за ПГС) і менш продуктивна. Це виробництво розташовано у спеціалізованому цеху, де можливості механізації обмежені. Тюбінги, виготовлені за ПГС-процесом, за товарним виглядом та якістю, поза сумнівом, поступаються тюбінгам, виготовленим за фурановою технологією формовки.

На заводі Донецьміськмаш (м. Донецьк) виливали тюбінги за такою технологією. Ливарні форми з ПГС після теплової сушки покривали графітовою фарбою ГП-1. Сушку форм проводили в камерних сушарках при 350-390 °С. Стрижні виготовлялися з РСС (рідкорухома самотвердна суміш) на лігносульфонаті технічному рідкому як сполучному. Стрижні фарбували ГП-1 і висушували в камерних сушарках протягом 5 год. Виготовляли форми на формувальні машинах відповідних розмірів. Виливки виходили дуже чистими та гладкими.

Виробництво тюбінгів на Московському механічному заводі Головтоннельметробуду колишнього СРСР, за словами в. о. головного інженера цього заводу Кузнецова С.І. не відповідало вимогам тогочасного ливарного виробництва [8]. Форми отримували на струшувальних формувальних машинах мод. 235, 236. Номенклатура тюбінгів (близько 50 найменувань) відповідала збірним кільцям діаметром 7500, 8500 і 9500 мм. Матеріал тюбінгів – СЧ20, плавильний агрегат – вагранка продуктивністю 15 т/год, швидкість заливання металу – 10-20 кг/с. Матеріал форм та стрижнів – типова ПГС. Сушили лише стрижні. Брак за 1986 р. у вигляді скипів, виходу металу в тріщини форм і стрижнів, обвалів, ужимин та ін. – 9 %. Маса різних тюбінгів складала від 350 до 1950 кг.

Технологія лиття тюбінгів на Криворізькому центральному рудоремонтному заводі (КЦРЗ) була така. У 80-ті роки минулого століття КЦРЗ виробляв один різновид тюбінгів масою 700 кг із СЧ20, який виплавляли в електродуговій печі ДС-6Н1. Температура заливки - 1320-1340 °С і тривалість заливання одного тюбінгу - 60-80 с. Форми виготовляли на автоматизованій формувальній лінії на базі 10-тонного струшувального столу конструкції КЦРЗ в опоках одних розмірів (1800x1200)x500:500 з рідкоскляної суміші традиційного складу і затвердінням вуглекислим газом (СО<sub>2</sub>-процес) без нагрівання. Брак виливків становив 8,2 % таких видів: заливи по роз'єму, подутості, засмічення, тріщини, спай.

На Волгоградському заводі «Барикади» виливали тюбінги одного різновиду для швидкісного волгоградського трамваю. Маса виливка – 526 кг із переважаючою товщиною стінки 22 мм з чавуну СЧ 21-40 (ГОСТ 1420-70), який виплавляли у коксовій вагранці з холодним дуттям, температура



залиття – 1270-1300 °С. Форми виготовлялися вручну з ПГС та з наступним сушінням в камерній сушарці на глибину просушування – 60 мм. Форми покривали до сушіння водяною фарбою за допомогою пензля. Брак - 1,5-2,0 %, в основному по засміченням.

На Череповецькому металургійному комбінаті (МК) виливали тюбінги одного різновиду одиничною масою 612 кг. Форми виготовляли з рідкоскляної суміші за CO<sub>2</sub>-процесом. Брак лиття, переважно за газовими раковинами, становив від 2-3 до 4,7 %.

На Жданівському МК ім. Ілліча (колишній Жданов – нині Маріуполь) наприкінці 80-х років минулого століття виливали тюбінги одного виду масою 930 кг при переважаючих товщинах стінок 35-40 мм із СЧ20 з виплавою його в електропечі ДСП-2. Температура заливки була 1250-1270 °С, тривалість заливки одного тюбінгу - 50-55 с. Форми виготовляли на струшувальних формувальних машинах мод. 235 з ПГС і заливали в сирому стані. Брак, здебільшого з засмічень і обвалів, становив 7 %.

На Магнітогорському МК виробляли тюбінги одного виду масою 612 кг з переважаючими товщинами стінок 22-30 мм із СЧ20, який виплавляли в індукційній тигельній печі ІЧТ-10М2 і заливали у форми при 1290-1320 °С зі швидкістю 15-17 кг/с. Форми виготовляли на струшувальній формувальній машині з ПГС, фарбували цирконовою фарбою і висушували в камерній сушарці протягом 8 год до глибини просушування 70 мм. Брак, переважно по засміченням, складав 8-12 %.

На Запорізькому МК виготовлялися тюбінги одного різновиду одиничною масою 880 кг, переважною товщиною стінок – 20-40 мм із чавуну СЧ20, температура заливки якого - 1250-1270 °С зі швидкістю 20 кг/с. Форми виготовляли на струшувальних формувальних машин мод. 234 і 236 з ПГС і висушували в камерних сушарках протягом 12 год при 300-350 °С. Форми перед сушінням фарбували графітовою фарбою. Брак лиття складав 10-12 %. Основні види браку – засмічення та ужимини.

Карагандинський МК виробляв тюбінги одного різновиду масою 762 кг/шт. при переважній товщині стінки 22 мм і з чавуну СЧ20, що виплавляли в 10-тонній вагранці холодного дуття, температура залиття - 1280-1300 °С, швидкість залиття – 17 кг/с. Форми виготовляли на струшувальних формувальних машинах мод. 234 з ПГС, фарбували графітовою фарбою і висушували в камерній сушарці. Брак від ужимин, газових і шлакових раковин становив 6-7 %.

На Криворізькому МК Криворіжсталь виробляли тюбінги двох видів масою 736 та 878 кг/шт. із СЧ20 при товщинах стінок 50-70 мм. Плавильний агрегат – електродугова піч ДСН-5, температура залиття – 1320-1350 °С, тривалість залиття 40-50 с. Формовка – на машині, що струшує, мод. 234. Матеріал форми – ПГС, заливали чавун у сирому формі. Брак (засмічення, ужимини) становив 12,3 %.

На Ленінградському заводі Лентрубліт виливали кільця тюбінгові двох видів для метрополітену: перший вид – кільце з 10 фрагментів (тюбінгів) масою від 196 до 529 кг, загальна маса кільця – 5371 кг з чавуну СЧ20; другий різновид – кільце з 17 тюбінгів масою від 280 до 795 кг, маса кільця 11880 кг з СЧ20. Чавун виплавляли у водоохолоджуваній вагранці з безперервним випуском металу у поворотний копильник. Плавильна кампанія – тиждень. Температура заливки 1220-1260 °С, час залиття одного тюбінгу - від 25 до 40 с залежно від його маси. Форми виготовляли на машині, що струшує, мод. 235С1. Матеріал форми – ПГС. Заливали чавун у сирому формі без теплового сушіння. Брак тюбінгів – 5 %.

Наприкінці 70-х років минулого століття на Лентрубліті було створено аналогічне Дніпроважмашу спеціалізоване виробництво тюбінгів зі спробами виливання тюбінгів із чавуну підвищеної міцності. Тонкостінні тюбінги дослідного виробництва мали товщину спинок 8-9 мм і масу зібраного кільця не більше 3 т. Проте серійний процес, що потребував заміни сирого форми, в заводських цехах налагодити не вдалося, як і забезпечити взаємозамінність серійних тюбінгів із СЧ20 на тонкостінні, зокрема з високоміцного чавуну (ВЧ) марки ВЧ50 [4, 8].

На Новолипецькому МК виготовляли тюбінги одного різновиду масою по 700 кг для Московського метрополітену. Переважна товщина стінок – 22 мм, чавун – СЧ20. Плавильний агрегат – ДСП 25Н01, температура заливки -1330 °С і тривалість заливки форми – 35 с. Форми виготовляли на формувальній машині мод. 234М, а заливку чавуну проводили у сирому формі. Різноманітний брак складав 7-10 %.

На Кузнецькому МК виробляли тюбінги одного виду масою 612 кг із СЧ20. Переважна товщина стінок – 40 мм. Чавун виплавляли у вагранці і заливали при 1220-1260 °С в сирому формі з ПГС. ПГС мала ту особливість, що у ній вміст кам'яновугільного порошку складав 6-7 %. Брак лиття (переважно засмічення, ужимини, пригар) становив 13-14 %.

Новокузнецький МК виробляв тюбінги одного різновиду одиничною масою 1100 кг при товщинах стінок 30-50 мм із СЧ20. З тюбінгів цього типу складали шахтне кільце великого діаметру. Чавун виплавляли в індукційній печі ІЛТ-10, температура заливки -1260-1280 °С, залиття чавуну у сирому формі – 20-22 кг/с. Формувальний агрегат – піскомет ПН-40 виробництва Сиблітмаш. Матеріал форми – ПГС. Форму не фарбували, а напиляли на її поверхню цемент марки 400. Брак складав 6,14 %

за видами: ужимини, тріщини, засмічення.

У 70-х роках минулого століття передбачалося будівництво на ДЗМО нового цеху тюбінгів полегшеної конструкції з використанням розробленої ЦНДІТМашем формовки з сипкої рідкоскляної суміші (РС) з затверджувачем – ферохромовим шлаком та додатковим затверджувачем форм –  $\text{CO}_2$  [7]. Форми підлягали фарбуванню водною цирконовою фарбою та короткочасному підсушуванню теплом. Передбачалося, що стрижні також виготовлятимуть із РС та лиття тюбінгів не з сірого, а міцнішого чавуну. Однак, технологію не вдалося реалізувати, вона виявилася громіздкою, непродуктивною та неекономічною.

Загалом, за описом [8] виявлено, що на абсолютній більшості заводів колишнього СРСР тюбінги виготовлялися у формах із сирової ПГС і традиційним матеріалом для тюбінгів служив чавун СЧ20. Також проведеними науково-технічними дослідженнями було встановлено, що тюбінги доцільно виливати з ВЧ, який підвищує міцність конструкції, при традиційних товщинах стінок дозволяє безпечну експлуатацію тюбінгів в умовах високих навантажень, або значно (в 1,5-2,0 рази) знизити масу тюбінгів при колишніх навантаженнях для тюбінгів з СЧ20. Феритно-перлітна структура ВЧ підвищує економічність тюбінгових конструкцій. Вища пластичність ВЧ у виливку знижує концентрацію напруг, що виникають на з'єднаннях фланців як в межах окремого кільця, так і в напрямку труби з набором кілець. Деталі з ВЧ менше схильні до відбілу чавуну, ніж такі ж деталі з СЧ20 (та дослідні з СЧ30), що покращує механічну оброблюваність перших. ВЧ забезпечує кращу заповнювальність форми металевим розплавом для легшого виконання тонких деталей, зменшення спаїв і недоливів. Проте, серійне виробництва тюбінгів з ВЧ не знайшло поширення на заводах колишнього СРСР [8].

Нинішні вимоги воєнного часу не залишають вибору щодо пріоритетів промислової політики, актуалізуючи розвиток вітчизняного ВПК та виробництва товарів подвійного призначення у найближчому майбутньому. При цьому захист таких виробів та устаткування, а також людських і матеріальних ресурсів потребують створення нових технологій для виготовлення захисних споруд багатофункціонального призначення та збільшення живучості наявних для цього споруд чи будівель.

Науковим відділом проф. О. Шинського у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України, реалізуючи потенціал технології лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), ведуться дослідження по створенню модульних литих легковагих конструкцій для побудови як стаціонарних, так і мобільних захисних споруд. ЛГМ дозволяє отримувати виливки з собівартістю, близькою до такої для литва в форми з сирової ПГС. Особливо економічно вигідно ЛГМ-процес проявляється при виливанні дрібносерійної продукції достатньо крупних габаритів (для конкретних металевих споруд) за разовими моделями, отриманими вирізанням з пінополістиролу на 3D-фрезері за кресленням з монітору комп'ютера чи на столі нагрітим ніхромовим дротом за шаблонами. При цьому враховується як новітній досвід виробництва і гідроізоляції при монтажу тюбінгів [9], так і проектується нові металоконструкції збірних захисних споруд, обидва приклади наведено на рис. 3.

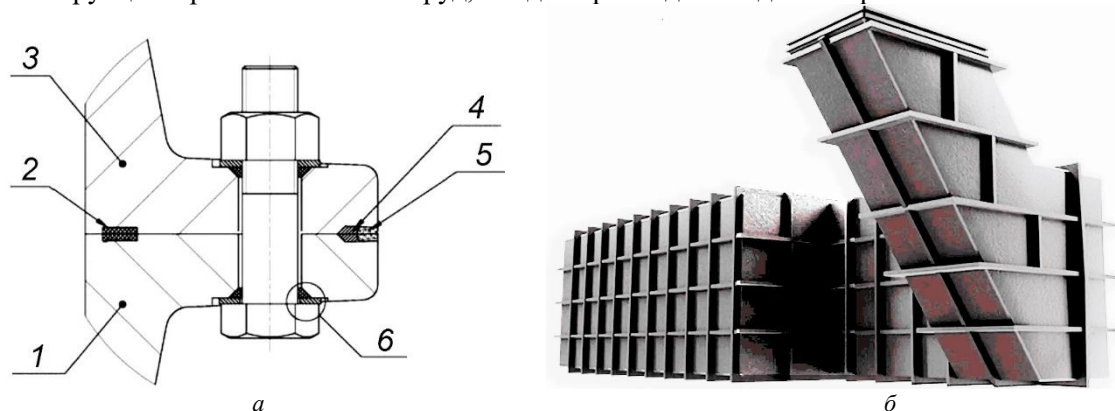


Рисунок 3 – Приклади: *a* – вузла болтового з'єднання тюбінгів з гідроізоляцією: 1 – тюбінг № 1; 2 – гідроізоляційні профілі; 3 – тюбінг № 2; 4 – свинцевий дріт; 5 – цемент, що розширюється; 6 – комплект болтового з'єднання; *б* – збірної захисної металевої споруди.

Наразі відпрацьовується технологія лиття сегментів захисних споруд з високоміцних сплавів, передусім з ВЧ, з оптимальними товщинами стінок [10]. Для виготовлення протирадіаційних укриттів доцільно, як аналог, для них адаптувати спосіб [11] виготовлення виливка корпусу контейнера з ВЧ для захоронення та транспортування радіоактивних відходів, литий корпус якого з метою зменшення металоемності виконаний тришаровим. Між двох стінок з високоміцного феритного чавуну при

випливають виконують внутрішній прошарок з перекристалізованого кам'яного петрургічного матеріалу. Цей прошарок в стінках контейнера на 20 % зменшує масу вилівка за рахунок того, що питома вага феритного ВЧ складає близько 7000 кг/м<sup>3</sup>, а кам'яного петрургічного матеріалу 3400 кг/м<sup>3</sup>, але практично не зменшує рівень біологічного захисту від радіоактивних відходів, бо його показник лінійного коефіцієнту ослаблення гамма-квантів - в межах 0,41-0,45см<sup>-1</sup>, а феритного ВЧ – в межах 0,42-0,47см<sup>-1</sup> [11].

### Висновки

В нинішніх умовах воєнного часу захист людських і матеріальних ресурсів, продукції та устаткування ВПК конче потребує створення нових технологій для виготовлення захисних споруд багатофункціонального призначення та збільшення живучості наявних для цього споруд чи будівель. За Законом України усі нові будинки – і п'ятиповерхові, і великі на декілька під'їздів з 24 поверхами, мають бути обладнані бомбосховищами. Нові бомбосховища мають з'явитись і в існуючій забудові, що дозволить створити в Україні мережу захисних споруд. В процесі проведення науково-технічних досліджень по цій темі на основі огляду історії і досягнень у галузі виготовлення і застосування металевих матеріалів і конструкцій у будівництві підземних та захисних споруд виконано аналіз здобутків і недоліків. Особливу увагу зосередили на практичній реалізації ливарної технології виготовлення тубінгів на підприємствах колишнього СРСР, як найбільш близьких до нинішніх часів виробництва з вагомими результатами, доступними для запозичення і конструкторсько-технологічного удосконалення. Нарощування виробництва будівельного литва пропорційно збільшувало об'єми будівництва. Виявлено необхідність і можливість задля інтенсифікації будівництва підземних та захисних споруд збільшення застосування у цій галузі металевих матеріалів шляхом застосуванням високоміцних ливарних сплавів, передусім високоміцних чавунів, а також ресурсоефективних точних ливарних методів виготовлення будівельних та захисних сегментів чи тубінгів. Найбільш придатною технологією для такого виробництва тонкостінних легковагих металовиробів на нинішній час є ЛГМ-процес, який після удосконалень за останні десятиліття, в тому числі завдяки 3D-технологіям і адаптації до використання новітніх сплавів, має потенціал для забезпечення росту будівництва як стаціонарних, так і мобільних захисних споруд.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Проект Закону про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо забезпечення вимог цивільного захисту під час планування та забудови територій. URL: <https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/Card/39666>.
2. Міністерство освіти і науки України. Захисні споруди цивільного захисту. URL: <https://mon.gov.ua/ua/ministerstvo/diyalnist/civilnij-zahist-ta-bezpeka-zhittvediyalnosti/zahisni-sporudi-civilnogo-zahistu>.
3. Швець В.Б., Бойко І.П., Винников Ю.Л., М.Л. Зоценко та ін. Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти: Підручник. Дніпропетровськ: «Пороги», 2014. 231 с.
4. Мосолов Д.А. Ефективні конструктивні параметри полегшених чавунних обробок тунелів метрополітенів: дис... канд. техн. наук. 05.23.11. Наук. -Дослід. ін-т транспортного будівництва. М., 2007. 205 с.
5. Barry N. Whittaker, Russell C. Frith. Tunnelling: design, stability and construction. Institution of Mining and Metallurgy, 1990. P. 284.
6. Мішеченко О.О. Історія розвитку кріплення з чавунних тубінгів та перспективи її застосування у сучасному підземному будівництві. Гірський інформаційно-аналітичний бюлетень. 2007. № 1. С. 36-40.
7. Бокій Б.В., Федоров С.А., Зіміна Є.А., Тимофеев О.В. Технологія та механізація будівництва підземних споруд та шахт. М.: "Надра", 1971. 712 с.
8. Білобров Є.А., Карпенкова О.Л., Білобров Л.С., Білобров Є.Л. Технології виробництва литих тубінгів. Лиття України. 2017. № 2. С. 18-23.
9. Колонтаєвський Є.В., Мішеченко А.А. Гідроізоляція комбінованого чавунно-бетонного кріплення. Метро та тунелі. 2020. № 3. С. 34-41. Патент 126031 Україна, МПК В22 D7/00, В22 D23/00. Виливок з чавуну з кулястим графітом / В.С. Дорошенко, В.О. Шинський. Опубл. 11.06.2018, Бюл. № 1.
10. Патент 88741 Україна, МПК В22D 25/00, В22D 15/00, G01F 5/00. Спосіб виготовлення вилівка корпусу контейнера для захоронення та транспортування радіоактивних відходів / Д.С. Козак, В.Б. Бубликов, А.А. Шейко та ін. Опубл. 10.11.09.2009, Бюл. № 21.

### REFERENCES

1. Proekt Zakonu pro vnesennya zmin do deyakikh zakonodavchykh aktiv Ukrayiny shchodo zabezpechennya vymoh tsyvil'noyi zakhystu pid chas planuvannya ta zabudovy terytoriy. URL: <https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/Card/39666>.
2. Ministerstvo osvity i nauky Ukrayiny. Zakhysni sporudy tsyvil'noho zakhystu. URL: <https://mon.gov.ua/ua/ministerstvo/diyalnist/civilnij-zahist-ta-bezpeka-zhittvediyalnosti/zahisni-sporudi-civilnoho-zahistu>.
3. Shvets' V.B., Boyko I.P., Vinnikov YU.L., M.L. Zotsenko ta in. Mekhanika gruntiv. Osnovy ta fundamente: Pidruchnyk. Dnipropetrovs'k: "Porohy", 2014. 231 s.



4. Mosolov D.A. Efektivni konstruktyvni parametry polehshenykh chavunnykh obrobok tuneliv metropoliteniv: dys... kand. tekhn. nauk. 05.23.11. nauk. -Osvid. in-t transportnoho budivnytstva. M., 2007. 205 s.
5. Barry N. Whittaker, Russell C. Frith. Tunnelling: design, stability and construction. Institution of Mining and Metallurgy, 1990. P. 284.
6. Mishedchenko O.O. Istoriya rozvytku kriplennya z chavunnykh tyubinhiv ta perspektyvy yiyi zastosuvannya u suchasnomu pidzemnomu budivnytstvi. Hirs'kyi informatsiyno-analitychnyy byuleten'. 2007. № 1. S. 36-40.
7. Bokiy B.V., Fedorov S.A., Zimina YE.A., Tymofeyev O.V. Tekhnolohiya ta mekhanizatsiya budivnytstva pidzemnykh sporud ta shakht. M.: "Nadra", 1971. 712 s.
8. Bilobrov YE.A., Karpenkova O.L., Bilobrov L.YE., Bilobrov YE.L. Tekhnolohiyi vyrobnytstva lytykh tyubinhiv. Lyttya Ukrayiny. 2017. № 2. S. 18-23.
9. Kolontayevs'kyu YE.V., Mishedchenko O.O. Hidroizolyatsiya kombinovanoho chavunno-betonnoho kriplennya. Metro ta tuneli. 2020. № 3. S. 34-41. Patent 126031 Ukrayina, MPK B22 D7/00, B22 D23/00. Vylyvok z chavunu z kulyastym hraftom / V.S. Doroshenko, V.O. Shyns'kyu. Opubl. 11.06.2018, Byul. №1.
10. Patent 88741 Ukrayina, MPK B22D 25/00, B22D 15/00, G01F 5/00. Sposib vyhotovlennya vylyvka korpusu konteynera dlya zakhoronennya ta transportuvannya radioaktyvnykh vidkhodiv / D.S. Kozak, V.B. Bublykov, A.A. Sheyko ta in. Opubl. 10.11.09.2009, Byul. №21.

**Дорошенко Володимир Степанович** – д-р техн. наук, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (м. Київ), e-mail: [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-0070-5663](https://orcid.org/0000-0002-0070-5663).

**Янченко Олександр Борисович** – кандидат техн. наук / Ph.D., доцент, кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-3888-3772](https://orcid.org/0000-0002-3888-3772).

**V. Doroshenko<sup>1</sup>**  
**O. Yanchenko<sup>2</sup>**

## METAL BEARING AND SEALING STRUCTURES FOR UNDERGROUND AND PROTECTIVE STRUCTURES

<sup>1</sup>Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv  
<sup>2</sup>Vinnytsia National Technical University

*The development of new technologies for the construction of multi-purpose protective structures reflects the current need to improve measures to protect civilian human and material resources (and dual purpose) and increase defense capability with the help of structures, buildings, storage and shelters. For a thorough assessment of known developments on this topic, a review of the history and achievements in the field of production and use of metal materials and structures in the construction of underground and protective structures was carried out, achievements and shortcomings were analyzed. The main attention was paid to the experience of large-tonnage production of cast iron tubing at the enterprises of the former USSR, as the closest to modern times of large-scale production with significant results, useful for study and improvement in design and technological directions. Since the sixties of the last century, 25,000 to 40,000 tons of cast iron tubing were produced annually in the former USSR for fastening underground structures of various purposes, including for protective and special facilities. Almost all the trunks of Metrobud, many trunks of the Ministry of Defense and other ministries of the former USSR constantly used cast iron tubing at their facilities. For the present time, the necessity and possibility of intensification of the construction of protective structures through the use of metal materials, in particular high-strength casting alloys, especially high-strength cast irons, as well as resource-efficient casting methods for the production of construction and protective segments or tubing, have been identified. The most suitable technology for such production of thin-walled lightweight metal products at the present time is the Lost Foam casting process, which, after improvements over the past decades, including thanks to 3D technologies and adaptation to the use of the latest alloys, has the potential to ensure the growth of both stationary and mobile construction protective structures.*

**Keywords:** protective structures; protective structures; cast materials; tubing; cast iron; high-strength cast iron; Lost Foam casting.

**Doroshenko Volodymyr** – Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher, Department of Physical Chemistry of Foundry Processes, Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv), e-mail: [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-0070-5663](https://orcid.org/0000-0002-0070-5663).

**Yanchenko Olexander** – PhD (Engin.), Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Vinnytsia National Technical University, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-3888-3772](https://orcid.org/0000-0002-3888-3772).