

МОДЕЛЮВАННЯ ВИЛИВКІВ ЯК ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З МЕТОЮ МЕТАЛОЗБЕРЕЖЕННЯ



Володимир Дорошенко

канд. техн. наук,
ст. наук. співроб.,
Фізико-технологічний інститут
металів і сплавів НАН України,
м. Київ

Розглянуто методи моделювання виливків оболонкових конструкцій в процесі досліджень за темою «Розробка наукових і технологічних основ по створенню литих конструкцій з чорних і кольорових сплавів, оптимальних процесів їх отримання і автоматизованих методів проектування». Тема обґрунтована тим, що комп'ютерні програми відомих іноземних компаній (MagmaSoft (Німеччина), ProCast (США, Франція), Полігон (Росія), SolidCast (США) і ін.), якими можуть користуватися вітчизняні ливарники, створені для оцінки процесів у ливарній формі без оптимізації литих конструкцій і сприймають вилівок як уже готовий, створений конструктором продукт. Ці програми не адаптовані до спеціальних методів лиття, які розвиває ФТІМС НАН України, – таких, як лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), за моделями, що витоплюються, розчиняються або за крижаними моделями, у поєднанні з гравітаційним заливанням у ливарну форму розплавленого металу або із заливанням під надлишковим тиском, включаючи специфіку нероз'ємних форм. Відсутні в цих програмах і можливості оцінки процесів у ливарній формі з використанням низькотемпературних, оболонкових форм при отриманні виливків з армуючою фазою в порожнині форми, що наближає виливки до виробів з композитних матеріалів.

Актуальним завданням при створенні нових матеріалів і технологій для сучасного машинобудування є істотне зниження матеріаломісткості і зростання ресурсу литих деталей, які за масою і кількістю займають до 50 % від загальної потреби в металопродукції, за умови одночасного скорочення матеріальних, енергетичних витрат і екологічного навантаження на навколишнє середовище. Такі деталі відповідають за конкурентоспроможність нової техніки для різних галузей виробництва.

За наявності в Фізико-технологічному інституті металів і сплавів (ФТІМС) НАН України нових вискоєфективних литих матеріалів, методів їх плавлення і подальшої обробки є потреба реалізації їхніх переваг шляхом підвищення службових характеристик виливків при отриманні їх у таких піщаних формах, які дозволять суттєво підвищити їхню розмірну точність, створити задані умови для тверднення і структуроутворення металу виливків при скороченні матеріало- і енерговитрат та шкідливих викидів у навколишнє середовище. До таких методів належать різновиди лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), в вакуумованих чи поєднаних, наукові і технологічні основи яких, включаючи новітнє обладнання, постійно удосконалюються представниками наукової школи проф. **О.І. Шинського** [1].

Багато методів розрахунку і конструювання литих деталей в країнах СНД, Україні та нормативна база для цього побудовані на емпіричних рівняннях з урахуванням процесів формоутворення, створених ще в 60–70 рр. минулого століття і

не дозволяють реалізувати складні конструкції з високою розмірною точністю. Державні стандарти України (ДСТУ) – ГОСТ 26645-85, ГОСТ Р 53464-2009 – для литих деталей з габаритами 500–1500 мм при литті в піщані форми передбачають значні допуски, що ведуть до збільшення товщини стінок виливків і їх маси на 50–80 %, а також допуски в межах 9–11 квалітетів цих ГОСТів гальмують ефективне використання високоміцних сплавів (сталей, чавунів, алюмінію) тому, що зменшення товщини виливків відповідно до підвищення міцності їх металу нівелюється високими допусками на розміри виливків. Тому сучасні литі конструкції в Україні та країнах СНД перевищують розрахункові по металомісткості в 1,5–2 рази, а в Західній Європі – в 1,3–1,5 рази, що призводить до перевитрат енергоносіїв і шихтових матеріалів та трудомісткості їхнього виробництва в 1,5–2 рази.

Спільна оптимізація металокопункції і технології її лиття з метою досягнення максимального коефіцієнта використання металу запропонована на прикладі оболонкових конструкцій, габаритні розміри стінок яких у 5-10

і більше разів перевищують товщину цих стінок. Залежно від загальних розмірів, конструктивного оформлення, характерних особливостей виготовлення і експлуатації оболонкові конструкції можна розділити на негабаритні ємності і корпуси, труби і трубопроводи, ємності, що працюють під тиском (рис. 1). Вони мають наскрізні або закриті канали. Їхні ребра можна представити у вигляді арок, а також застосувати моделювання методом перевертання ланцюгової лінії для пошуку ідеального обрису для арок і куполів за аналогією, відомою в будівництві. Подібні арокні і оболонкові елементи мають, крім люків і корпусів контейнерів, наприклад, такі масові чавунні виливки, як каналізаційні та телефонні люки, дощоприймачі, горизонтальні тротуарні решітки та навіть корпуси імпульсного руйнування, якими є артилерійські боеприпаси тощо. Однорідна арка в формі перевернутої ланцюгової лінії зазнає деформації тільки стискання, а не вигину. На рис. 1 показані приклади різнопланових пінопластових моделей виливків оболонкових конструкцій, включаючи деталі трубоної арматури, тиглів та інших корпусних деталей.



Рис. 1. Приклади моделей виливків оболонкових конструкцій

Для оптимізації оболонки у тривимірному вимірюванні застосовується метод інверсії гнучких висячих сіток, що формуються з плоского положення під дією сили тяжіння. Метод фізичного моделювання опорної поверхні безмоментної склепінчастої оболонки складної криволінійної поверхні реалізують шляхом перевертання висячих сіток [2]. Таку сітку-павутину, звисаючу зі стелі, часто використовував архітектор *А. Гауди* (1852–1926). Суть моделювання полягає в умовному прирівнюванні сил стиснення до сил розтягування; купол імітують у перевернутому вигляді. Мотузки з гирьками замінюють зображення частини купола, колони, стіни. На мотузці через кожні 5 см кріплять свинцеві гирьки вагою 10 г (якщо стіна товщиною в пів цеглини) та 20 г (якщо товщина стіни в цілу цеглину). Виходить ланцюг з гирьок. Якщо купол повинен встановлюватися на шести розгалужених колонах, то до стелі підвішують шість таких масштабованих ланцюгів і до їх кінців кріплять мотузки з гирьками пропорційно до ваги купола. У результаті отримують «ланцюговий» прогин. Залишається окреслити форму, зафіксувати пропорції лінійкою і перевернути картинку. Якщо на купол треба поставити статую, то до центру мотузкової павутини підвішують вантаж, відповідний до ваги статуї. Форма купола змінюється – він витягується. У результаті змінюється кут «колони».

Однак запропоновані сьогодні висячі сітки – це спеціальні гнучкі, досить дорогі конструкції, що розтягуються [2], з плоского положення яких часто складно сформувані під дією сили тяжіння оболонку необхідної опуклості при закріпленні її над отвором довільної форми. Тому для оболонкових конструкцій за аналогією до моделювання методом перевертання висячих сіток запропоновано моделювання методом перевертання провисаючої нагрітої термопластичної синтетичної плівки.

Для випробувань у ФТІМС використовували поліетиленову плівку або плівку севілен марки 11304-075, ТУ 6-05-1636-97, яка часто застосовується (при не менше 6-кратному видовженні) для облицювання модельних комплектів у випадку вакуумного формування. Товщина плівки – в межах 75–100 мк. Плівка при нагріванні в ливарному цеху до пластичного стану провисала під власною вагою. Випробували моделювання форми виливки кришки люка поліетиленовою плівкою, закріпивши її в отворі і нагріваючи ґратами з трубчастих електронагрівачів (ТЕН). Коли плівка провисала на необхідну відстань, її фотографували збоку для обробки зображення на комп'ютері. Величину провисання регулювали зміною температури ТЕНів або ступеня їх наближення до плівки. Для глибокого провисання допустиме застосування нагрівачів інфрачервоного випромінювання або іншого типу. Плівка легко закріплюється по краю отвору будь-якої конфігурації, а подібна технологія нагрівання добре відпрацьована для процесу вакуумного піщаного формування. Це спрощує моделювання без застосування висячих сіток особливої конструкції зі спеціальними властивостями і складним процесом регулювання ступеня їх провисання.

Запропоновано комп'ютерне моделювання таким же методом деталей литого контейнера для захоронення радіоактивних відходів (РАВ), описаним у роботах [3–5]. Моделювання оптимальної форми стінок і вставок у них з кам'яного матеріалу та застосування армованих конструкцій замість просторових каркасів дозволить полегшити

випробування шляхом зниження витрат металу при збереженні службових властивостей корпусу контейнера. Розглянемо цю тему докладніше.

Серед оболонкових виробів раціональна конструкція контейнерів для захоронення РАВ і їх виробництво актуальні для нашої країни, оскільки Україна входить до порівняно невеликої групи країн, в яких левова частка виробленої електроенергії належить атомній енергетиці. З розвитком атомної енергетики в світі загострюється проблема ізолювання РАВ для запобігання їх впливу на навколишнє середовище. Методи обережного поводження з РАВ передбачають, що відходи повинні переробляти, зберігати, транспортувати та захороняти таким чином, щоб протягом усього терміну потенційної небезпеки вони не чинили б шкідливого впливу на людину і природне середовище. Проблема екологічно надійного і економічно виправданого поводження з РАВ актуальна для всіх країн.

Одним із можливих вирішень цієї проблеми, до якого схиляються фахівці більшості країн, полягає у фіксуванні радіонуклідів у твердій матриці (контейнері) і захороненні їх у геологічній формації або в спеціально побудованому сховищі. При цьому створюються два захисних бар'єри, що перешкоджають витоку радіонуклідів, – це штучний бар'єр у вигляді захисного контейнера і природний бар'єр у вигляді гірської породи або стінок бетонного сховища в поєднанні з товстим шаром ґрунту. Реалізація такої стратегії передбачає використання нових матеріалів і технологій виготовлення контейнерів, що забезпечують екологічно безпечне поводження з РАВ.

З матеріалів для виготовлення контейнерів найчастіше використовують залізобетонні сплави і їх поєднання з іншими матеріалами: важкий бетон або переплавлені з наступною термообробкою гірські породи типу базальту, порфіриту, горнблендіту. Найбільш раціонально використовувати чавунні, сталеві литі або литозварні конструкції, армовані неметалічними матеріалами, які мають ряд фізико-хімічних і механічних властивостей, що дозволяють нейтралізувати дії РАВ. Як показали дослідження інституту ФТІМС, такі конструкції зручно і економічно вигідно отримувати методом ЛГМ, а роботи з промислового виготовлення та випробування двох видів багатошарових контейнерів виконані в інституті з патентуванням поліпшеної конструкції таких контейнерів і нового методу моделювання їхньої конструкції.

У циклі виробництва контейнерів науково-конструкторської групою під керівництвом проф. О.І. Шинського проведені приймальні випробування дослідних зразків контейнерів – пакувально-транспортних комплектів ПК-ТІВ-260-12/1 і ПК-ТІВ-260-60/1 (маркування за кресленням), – призначених для безпечного транспортування відпрацьованих джерел іонізуючого випромінювання типу ПК-7-3 і ПК-7-4 з ізотопом ^{60}Co . Ці контейнери можуть бути використані також для виконання робіт на підприємствах, де необхідно вилучити з ужитку відпрацьовані закриті джерела із зазначеним ізотопом.

Приймальні випробування проведені за «Програмою і методикою приймальних випробувань ПМВ-04-07 / 09», розробленою науково-виробничим підприємством (НВП) «Атомкомплексприлад» і узгодженою з Державним комітетом ядерного регулювання України. Ці випробування із залученням спеціалізованих організацій проводилися на території інституту ФТІМС. Було проведено перевірку на

відповідність вимогам технічного завдання для серійного виробництва комплектів на замовлення підприємств. Для проведення випробувань конструкторським сектором відділу формоутворення під керівництвом **В.В. Здохненко** була розроблена конструкторська документація на ванну для випробувань контейнерів на герметичність, на загін для скидання контейнерів з висоти для випробування конструкції в зборі та на автоклав для випробувань на герметичність при імітації занурення у воду на 15 м. Також було виконано проект будівництва спеціального майданчика для проведення скидання контейнерів з висоти 1,5 і 9 м.

Все це обладнання було виготовлено, і випробування контейнерів проведені. Обстеження зовнішнього вигляду кожної литозварної конструкції комплектів, її габаритних розмірів і маси показали відповідність технічному завданню. Була проведена перевірка стропових пристосувань, працездатності механізмів, захисних властивостей та перевірка на герметичність і дію удару (на глибину руйнування), збереження герметичності і захисних властивостей при скиданні з висоти 1,5 м. Зазначені випробування дали позитивні результати, після чого були проведені випробування на скидання з висоти 9 м, а також занурення у воду на глибину 15 м з контролем збереження герметичності, захисних властивостей і працездатності механізмів контейнерів. Завершення описаних випробувань дало всі підстави рекомендувати випробувану технологію для промислового виготовлення литозварних пакувально-транспортних комплектів зазначених марок, які є багаточисливими багатомісними контейнерами. Ці контейнери, що за своїми конструктивними особливостями (збільшення ємності при збереженні габаритних розмірів) не мають аналогів у світовій практиці, дозволяють раціонально використовувати площі сховищ ядерних відходів [3].

На рис. 2 а, б показані модель з пінопласту одного з контейнерів і виливок його корпусу (конструктор

К.Х. Бердієв). На рис. 2 в показано корпус і кришку контейнера при складанні для випробувань.

Запропоновано армування конструкцій контейнерів аж до лиття біметалевих конструкцій [4], а також розроблена конструкція литого корпусу контейнера для захоронення РАО з вставками з кам'яного матеріалу в стінках контейнера. Такі вставки подібні до піщаних ливарних стержнів, з усіх боків обливаються металом і залишаються в тілі виливка. Матеріал цих вставок має захисні функції не гірші металу, з якого відливають контейнер. Така конструкція тришарових стінок литого контейнера розроблена для зниження ваги виливка корпусу контейнера і запатентована [5]. Запропоновано обґрунтування для подальшого вдосконалення конструкції контейнера за допомогою фізичного моделювання оболонкових конструкцій.

Інтеграція вдосконалення оболонкових металоконструкцій з розвитком технології їх лиття зі сплавів підвищеної міцності є важливою умовою конструювання і виробництва конкурентоспроможних литих деталей. Застосування вакуумованої піщаної форми, що сприяє підвищенню рідкоплинності металу по спіральній пробі майже на 20 % у порівнянні з формами із сумішей зі зв'язувальним, дозволяє лити тонкостінні оболонкові металоконструкції, а застосування одноразових моделей підвищує точність виливків; обидва ці чинники дозволяють заощаджувати метал. По суті описане проектування конструкції контейнерів зі зниженням ваги виливків при збереженні їх необхідної міцності й захисних властивостей стало прикладом вирішення важливої проблеми металозбереження в машинобудуванні та інших галузях використання оболонкових виливків. Зниження металомісткості продукції і пов'язане з ним енергозбереження в потенційно екологічно небезпечному ливарно-металургійному комплексі закономірно веде до припинення забруднення навколишнього середовища та економії енергоносіїв. ■



а



б



в

Рис. 2. Модель із пінопласту (а); конструктор К.Х. Бердієв поруч із виливком корпусу малого контейнера (б); складання великого контейнера для випробувань (в)

Література

1. Шинский О.И. Снижение металлоемкости литейной продукции – основа развития отрасли. Оборудование и инструмент для профессионалов. 2011. № 1. С. 78–79.
2. Козлов Д.Ю. Топологический метод создания физических моделей точечных поверхностей. МАРХИ. 2008. № 1. <http://www.marhi.ru/AMIT/2008/1kvart08/Kozlov/article.php>.
3. Здохненко В. В., Дорошенко В.С. Литые контейнеры для захоронения радиоактивных отходов. Энергетика и промышленность России. 2013. № 01-02. С. 47.

4. Дорошенко В.С. Армированные конструкции для защиты от радиации, перевозки и захоронения радиоактивных отходов. 2009. С. 51–52.
5. Козак Д.С., Бубликов В.Б., Шейко А.А. та ін. Спосіб виготовлення виливка корпусу контейнера для захоронення та транспортування радіоактивних відходів. Пат. 90494 UA, МПК В22D 25/00, В22D 15/00, G01F 5/00. Опубл. 10.11.2009, бюл. № 21.