

## Моделирование отливок как оболочковых конструкций с целью металлосбережения

*Совместное совершенствование оболочковых металлоконструкций и технологии их литья является важным условием металлосбережения и конструирования конкурентоспособных литых деталей. Описаны новый способ моделирования оболочковых отливок и их примеры.*

**Ключевые слова:** моделирование, оболочковые конструкции, отливки, контейнеры, сбережение металла, ЛГМ

**А**ктуальной задачей при создании новых материалов и технологий для современного машиностроения является существенное снижение материалоёмкости и рост ресурса литых деталей, которые по массе и количеству занимают до 50 % от общей потребности в металлопродукции, при условии одновременного сокращения материальных, энергетических затрат и экологической нагрузки на окружающую среду. Такие детали отвечают за конкурентоспособность новой техники для различных отраслей производства.

При наличии в ФТИМС НАН Украины новых высокоэффективных литых материалов, методов плавления и внепечной обработки имеется потребность в реализации преимуществ путём повышения служебных характеристик отливок при получении их в таких песчаных формах, которые позволят существенно повысить их размерную точность, создать заданные условия для затвердевания и структурообразования металла отливок при сокращении материало-, энергозатрат и вредных выбросов в окружающую среду. К таким методам относятся разновидности литья по ледяным и газифицируемым моделям (ЛГМ) в замороженные и вакуумируемые формы, научные и технологические основы которых, включая новейшее оборудование, постоянно совершенствуются научной школой проф. О. И. Шинского [1].

В этой статье рассмотрен один из методов физического моделирования отливок оболочковых конструкций, созданный в составе исследований по теме «Разработка научных и технологических основ по созданию литых конструкций из чёрных и цветных сплавов, оптимальных процессов их получения и автоматизированных методов проектирования». Тема обоснована тем, что компьютерные программы известных иностранных компаний: MagmaSoft (Германия), ProCast (США, Франция), Полигон (Россия), SolidCast (США) и других, которыми могут пользоваться отечественные литейщики, созданы для оценки процессов в литейной форме без оптимизации литых конструкций и воспринимают отливку уже как готовый созданный конструктором продукт. Также эти программы не адаптированы к специальным методам литья, развиваемым ФТИМС НАН Украины, таким как ЛГМ, литьё по растворяемым, выжигаемым,

ледяным моделям, в сочетании с заливкой расплавленного металла под избыточным давлением или гравитационной, включая специфику неразъёмных форм. Отсутствуют в этих программах и возможности оценки процессов в литейной форме с использованием низкотемпературных, оболочковых форм, при получении отливок с армирующей фазой в полости формы, что приближает отливки к изделиям из композитных материалов.

Многие методы расчёта и конструирования литых деталей в странах СНГ, Украине и нормативная база для этого построены на эмпирических уравнениях с учётом процессов формообразования, созданных ещё в 60-70 гг. прошлого века, и не позволяют реализовать сложные конструкции с высокой размерной точностью. ГОСТ 26645-85, ГОСТ Р 53464-2009 для литых деталей с габаритами 500-1500 мм при литье в песчаные формы устанавливают значительные допуски, что ведёт к увеличению толщины стенок отливок и их массы на 50-80 %, а также допуски в пределах 9-11 квалитетов этих госстандартов тормозят эффективное использование высокопрочных сплавов (сталей, чугунов, алюминия) потому, что уменьшение толщины отливок пропорционально повышению прочности металла нивелирует высокие допуски. Поэтому современные литые конструкции в Украине и странах СНГ превышают расчётные по металлоёмкости в 1,5-2,0 раза, а Западной Европе – в 1,3-1,5 раза, что ведёт к перерасходу энергоносителей, шихтовых материалов, трудоёмкости их производства в 1,5-2,0 раза.

Совместная оптимизация металлоконструкции и технологии её литья с целью достижения максимального коэффициента использования металла предложена на примере оболочковых конструкций. В зависимости от габаритных размеров, конструктивного оформления, характерных особенностей изготовления и эксплуатации оболочковые конструкции можно разделить на негабаритные ёмкости и сооружения, сосуды, работающие под давлением, трубы и трубопроводы (рис. 1). Они обладают сквозными или закрытыми каналами. Их рёбра часто можно представить в виде арок, а также применить моделирование методом перевёртывания цепной линии для поиска идеального очертания для арок и куполов по



Рис. 1. Примеры моделей отливок оболочковых конструкций

известной в строительстве аналогии. Подобные арочные и оболочковые элементы имеют, кроме люков и корпусов контейнеров, такие массовые чугунные отливки, как, например, канализационные и телефонные люки, дождеприёмники, горизонтальные тротуарные решётки. Однородная арка в форме перевёрнутой цепной линии испытывает только деформации сжатия, но не изгиба.

На рис. 1 показаны разноплановые примеры пенопластовых моделей отливок оболочковых конструкций, включая детали трубной арматуры, тиглей и других корпусных деталей.

Для оптимизации оболочек в трёхмерном измерении известно применение метода инверсии гибких висячих сетей, формируемых из плоского положения действием силы тяготения. Метод физического моделирования опорной поверхности безмоментной сводчатой оболочки сложной криволинейной поверхности реализуют путём переворачивания висячих сетей [2]. Такую сеть-паутину, свисавшую с потолка, часто использовал архитектор А. Гауди (1852-1926). Суть моделирования – в приравнении сил сжатия силам растяжения, купол имитируют в перевёрнутом виде. Верёвки с грузами заменяют представление части купола, колонны, стены. Если стены были толщиной в полкирпича, то на верёвке, через каждые 5 см крепили свинцовые грузики по 10 г, если в полный кирпич – по 20 г. Получалась цепь из грузов. Если купол должен быть установлен на 6-ти разветвлённых колоннах, то к потолку подвешивали 6 таких масштабированных цепей и к их концам крепили верёвки с грузами, пропорционально весу купола. В итоге получали «цепной» прогиб. Оставалось обрисовать форму, зафиксировать пропорции линейкой и перевернуть картинку. Если на купол надо поставить статую, к центру верёвочной паутины подвешивали груз, соизмеримый со статуей. Форма купола изменялась, он вытягивался, меняли угол «колонны».

Однако предложенные сегодня висячие сети – это специальные, гибкие растягивающиеся достаточно дорогие конструкции [2], из плоского положения которых часто сложно сформировать действием силы тяготения оболочку требуемой выпуклости при закреплении её над отверстием произвольной формы. Поэтому для оболочковых конструкций по аналогии с моделированием методом переворачивания висячих сетей предложено моделирование методом переворачивания провисающей нагретой термопластичной синтетической плёнки.

Для испытаний использовали полиэтиленовую плёнку или сэвилен марки 11304-075, ТУ 6-05-1636-97, которая часто применяется при вакуумной формовке для облицовывания модельных комплектов при её не менее чем 6-кратном удлинении. Толщина плёнки – в пределах 75-100 микрон. Плёнка при нагревании до пластичного состояния в литейном цехе провисала под собственным весом. Опробовали моделирование формы отливки крышки люка полиэтиленовой пленкой, закрепив её в проёме и нагревая её решёткой из трубчатых электронагревателей (ТЭН). Когда плёнка провисла на требуемое расстояние, её фотографировали сбоку для обработки изображения на

компьютере. Величину провисания регулировали изменением температуры ТЭНов или степени их приближения в плёнке. Для глубокого провисания допустимо применение нагревателей инфракрасного излучения или другого типа. Плёнка легко закрепляется по краю проёма любой конфигурации, а подобная технология нагревания хорошо отработана для процесса вакуумной песчаной формовки. Это упростило моделирование без применения сетей особой конструкции со специальными свойствами и сложным процессом регулирования степени провисания.

Предложено физическое моделирование таким же методом деталей литого контейнера для захоронения радиоактивных отходов (РАО), описанного в работах [3-5]. Моделирование оптимальной формы стенок и вставок в них из каменного материала, применение армированных пространственными каркасами конструкций позволит облегчить отливку путём снижения расхода металла при сохранении служебных свойств корпуса контейнера. Рассмотрим эту тему подробнее.

Среди оболочковых изделий рациональная конструкция контейнеров для захоронения РАО и их производство актуально для нашей страны, поскольку Украина входит в сравнительно небольшую группу стран, львиной долей производимого электричества обязанных ядерной энергетике. С развитием атомной энергетики в мире обостряется проблема изолирования РАО для предотвращения их влияния на окружающую среду. Методы борьбы с влиянием РАО основаны на том, что они должны перерабатываться, храниться, транспортироваться и быть захороненными таким образом, чтобы на протяжении всего срока потенциальной опасности отходы не оказывали бы вредного влияния на человека и природную среду. Проблема экологически надёжного и экономически оправданного обращения с РАО актуальна для всех стран.

Одним из возможных решений этой проблемы, к которому склоняются специалисты большинства стран, заключается в фиксировании радионуклидов в твёрдой матрице (контейнере) и захоронении их в геологической формации или специально построенном хранилище. При этом создаются два защитных барьера, препятствующих выносу радионуклидов, – искусственный барьер в виде защитного контейнера и естественный барьер в виде горной породы или стенок бетонного хранилища в сочетании с толстым слоем грунта. Обеспечение такой стратегии предполагает использование новых материалов и технологий изготовления контейнеров, обеспечивающих экологически безопасное обращение с РАО.

Среди материалов, которые используют для изготовления контейнеров, чаще всего выступают железобетонные сплавы и их сочетание с другими материалами: тяжелый бетон, переплавленные с последующей термообработкой горные породы типа базальта, порфирифта, горнблендита. Наиболее рационально использовать чугунные, стальные литые или литосварные конструкции, армированные неметаллическими материалами, которые имеют ряд физико-химических и механических свойств, позволяющих нейтрализовать действия РАО. Как показал опыт

ФТИМС НАН Украины, такие конструкции удобно и экономически выгодно получать методом ЛГМ, а работы по промышленному изготовлению и испытанию двух видов многослойных контейнеров выполнены в институте с патентованием улучшенной конструкции таких контейнеров и нового метода моделирования их конструкции.

В цикле работ по производству контейнеров научно-конструкторской группой под руководством проф. О. И. Шинского проведены приёмные испытания опытных образцов контейнеров – упаковочно-транспортных комплектов ПКТІВ-260-12/1 и ПКТІВ-260-60/1 (маркировки по чертежу), предназначенных для безопасного транспортирования отработанных источников ионизирующего излучения типа ГІК-7-3 и ГІК-7-4 с изотопом  $^{60}\text{Co}$ . Эти контейнеры также могут быть использованы для выполнения работ на предприятиях, где необходимо исключение из употребления отработанных закрытых источников с указанным изотопом.

Приёмные испытания проведены по «Программе и методике приёмных испытаний ПМВ-04-07/09», разработанной НПП «Атомкомплексприлад», согласованной с Государственным комитетом ядерного регулирования Украины. Эти испытания с привлечением специализированных организаций проводились на территории ФТИМС НАН Украины. Выполнена проверка на соответствие требованиям технического задания для серийного производства комплектов по заказам предприятий. Для проведения испытаний конструкторским сектором отдела формообразования под руководством В. В. Здохненко была разработана конструкторская документация на: ванну – для испытаний контейнеров на герметичность; загон – для сбрасывания контейнеров с высоты (для испытания конструкции в сборе); автоклав – для испытаний на герметичность при имитации погружения на 15 м. Также выполнен проект строительства специальной площадки для проведения сбрасывания контейнеров с высоты 1,5 и 9,0 м.

Было изготовлено всё это оборудование и проведены испытания контейнеров. Обследование внешнего вида каждой литосварной конструкции комплектов, её габаритных размеров и массы показали соответствие техническому заданию. Выполнены проверки: строповых приспособлений, работоспособность механизмов, защитных свойств; на герме-

тичность и действие удара (на глубину разрушения); сохранения герметичности и защитных свойств при сбрасывании с высоты 1,5 м. Указанные испытания дали положительные результаты, после чего проведены испытания на сбрасывание с высоты 9 м, а также погружение в воду на глубину 15 м с контролем сохранения герметичности, защитных свойств и работоспособности механизмов контейнеров. Завершение описанных испытаний дало все основания рекомендовать опробованную технологию для промышленного изготовления литосварных упаковочно-транспортных комплектов указанных марок, которые являются многослойными многоместными контейнерами. Эти контейнеры по своим конструктивным особенностям (увеличение ёмкости при сохранении габаритных размеров) не имеют аналогов в мировой практике, что также позволит рационально использовать площади хранилищ ядерных отходов [3]. На рис. 2 показаны модель из пенопласта одного из контейнеров, отливка его корпуса рядом с конструктором К. Х. Бердыевым, также корпус и крышка контейнера при сборке для испытаний.

Предложено армирование конструкций контейнеров вплоть до литья биметаллических конструкций [4], а также разработана конструкция литого корпуса контейнера для захоронения РАО со вставками из каменного материала в стенках контейнера. Такие вставки, подобные песчаным литейным стержням, со всех сторон обливаются металлом и остаются в теле отливки. Материал этих вставок имеет защитные функции не ниже металла, из которого отливают контейнер. Такая конструкция трехслойных стенок литого контейнера разработана для снижения веса отливки корпуса контейнера и запатентована [5]. Предложено обоснование для дальнейшего совершенствования конструкции контейнера при помощи физического моделирования оболочковых конструкций.

Интеграция совершенствования оболочковых металлоконструкций с развитием технологии их литья является важным условием конструирования конкурентоспособных литых деталей. Применение вакуумируемой песчаной формы, способствующей повышению жидкотекучести металла по спиральной пробе почти на 20 % по сравнению с формами из смесей со связующим, позволяет лить тонкостенные оболочковые металлоконструкции, а применение



а



б

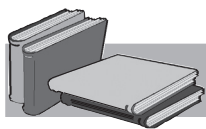


в

Рис. 2. Модель из пенопласта (а) и отливка корпуса малого контейнера (б), а также конструктор Бердыев К. Х. при сборке большого контейнера для испытаний (в)

разовых моделей повышает точность отливок, оба этих фактора приводят к сбережению металла. По своей сути описанное проектирование конструкции контейнеров со снижением веса отливок при сохранении их требуемой прочности и защитных свойств явилось примером или частным случаем решения

важной проблемы металлосбережения в машиностроении. Снижение металлоёмкости продукции и связанное с ним энергосбережение в экологически небезопасном литейно-металлургическом комплексе закономерно ведёт к сокращению загрязнения окружающей среды и экономии энергоносителей.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Шинский О. И. Снижение металлоёмкости литейной продукции – основа развития отрасли / О. И. Шинский // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2011. – № 1. – С. 78 – 79.
2. Козлов Д. Ю. Топологический метод создания физических моделей точечных поверхностей / Д. Ю. Козлов // МАРХИ – 2008. – № 1 (<http://www.marhi.ru/AMIT/2008/1kvart08/Kozlov/article.php>).
3. Здохненко В. В. Литые контейнеры для захоронения радиоактивных отходов / В. В. Здохненко, В.С. Дорошенко // Энергетика и промышленность России. – 2013. – № 01-02. – С. 47.
4. Дорошенко В. С. Армированные конструкции для защиты от радиации, перевозки и захоронения радиоактивных отходов / В. С. Дорошенко // Сотрудничество для решения проблемы отходов: Матер. VI Междунар. конф.(8–9.04.2009, Харьков). X.:ЭкоИнформ. – 2009. – С. 51-52.
5. Пат. 90494 UA, МПК В22D 25/00, В22D 15/00, G01F 5/00. Спосіб виготовлення виливка корпусу контейнера для захоронення та транспортування радіоактивних відходів / Д. С. Козак, В. Б. Бубликов, А. А. Шейко та ін.- Опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.

### Анотація

*Дорошенко В. С., Шинський В. О.*  
Моделювання виливків як оболонкових конструкцій з метою заощадження металу

*Спільне вдосконалення оболонкових металоконструкцій і технології їх лиття є важливою умовою заощадження металу і конструювання конкурентоспроможних литих деталей. Описано новий спосіб моделювання оболонкових виливків і їх приклади.*

### Ключові слова

*моделювання, оболонкові конструкції, виливки, контейнери, заощадження металу, ЛГМ*

### Summary

*Doroshenko V., Shynskiy V.*  
Simulation of casting as a shell structures in order to save metal

*Joint improvement of shell steel structures and technology of casting is an important condition for the metal and engineering savings competitive cast components. We describe a new method of modeling of shell castings and examples.*

### Keywords

*modeling, shell construction, castings, containers, saving metal, Lost Foam Casting*

Поступила 28.05.2015