

Анализ и идентификация литых легковесных металлоконструкций с использованием теории минимальных поверхностей

Применение литейных моделей с минимальной поверхностью обеспечит взаимодействие их поверхности с песком (а металла – с поверхностью формы) с минимальной энергией трения. При формовке в опоке практически любое их положение даст чёткий отпечаток на хорошо уплотнённом вокруг них песке, а отсутствие угловатости улучшит степень заполнения формы металлом. Принцип минимальной поверхности также эффективен при конструировании литниковых систем и прибылей, для которых важна минимальная теплоотдача от металла в песчаную среду.

Ключевые слова: отливки, конструирование, литьё по газифицируемым моделям, минимальная поверхность, сбережение металла, ячеистые конструкции

Резкое повышение спроса на продукцию машиностроения в ближайшие 10 лет будет стимулировать развитие мирового литейного производства [1], поскольку увеличение потребления отливок (достигшее 103,23 млн т в 2013 г.) пропорционально росту машиностроения. Свыше 75 % выпуска отливок получают в песчаных формах, что сохраняет актуальность совершенствования процессов песчаной формовки. Расширение применения 3D принтеров в литейных процессах практически снимает ограничения на конструктивные конфигурации отливок, позволяя отливать без литейной формы почти всё, что изображено на экране компьютера. Примеры таких отливок поражают совершенством своих конструкций, оптимизированных компьютерными программами с учётом сбережения металла [2], и начинают «задавать тон», стимулируя «подтягивание» до уровня «best-in-class» продукции известных процессов литья в песчаные формы, среди которых литьё в вакуумируемые песчаные формы обладает значительным потенциалом ресурсосбережения и конструктивного совершенствования отливок.

При разработке компьютерных систем конструирования литых деталей для литья по газифицируемым моделям (ЛГМ, Lost Foam Casting) в вакуумируемой песчаной форме металлоконструкцию рассматривали с учётом следующих условий литейного процесса. С одной стороны, материал пенопластовой модели является мелкоячеистой пеной, в которой воздух «упакован» в тонкие полистирольные оболочки, а заливаемый на модель металл (как в сосуд из песка, заполненный этой пеной) газифицирует эти оболочки и замещает модель.

С другой стороны, сухой песок при вибрации в процессе формовки по свойствам подобен «псевдожидкости», которая обтекает модель. Тогда литейную модель можно рассматривать как конструкцию для воздействия двух текучих сред: расплав металла, замещающий модель изнутри; песчаная среда (при формовке и выбивке), обтекающая её поверхность снаружи. Соппротивление трения текучей сре-

ды о твёрдую поверхность пропорционально площади этой поверхности. Отсюда наилучшие условия заполнения формы металлом и песчаной смеси вокруг модели будут при применении минимальной поверхности (МП) деталей модели [3, 4].

Теория МП – одна из классических и в то же время развивающихся областей математики – на стыке геометрии, топологии и вариационного исчисления. Наглядной реализацией МП служит мыльная плёнка, она затягивает контуры различной конфигурации и принимает форму, соответствующую минимуму потенциальной энергии (энергии поверхностного натяжения), которая прямо пропорциональна её площади.

Примеры металлопродукции, полученные 3D печатью, изобилуют ячеистыми конструкциями, проектирование которых также рассматривалось для способа ЛГМ [5, 6]. Концепция упрощённой сборки пенопластовых моделей ячеистых отливок в объёмные структуры путём применения повторяющихся унифицированных элементов серийного изготовления имеет аналоги в ряде математических теорий. Повторением некоторой элементарной ячейки также получен целый класс периодических МП. Элементарные ячейки многих из таких МП, в свою очередь, могут быть «собраны» из копий некоторого фундаментального элемента и его зеркального отражения.

Одним из замечательных примеров бесконечно соединяющейся и повторяющейся в трёх измерениях структуры с МП является гироид (gyroid). Образец отливки с такой МП в бронзе, полученный способом литья по выплавляемым моделям скульптором Вирсавией Гроссман (Bathsheba Grossman) показан на рис. 1, а [6]. Гироид описан американским физиком Аланом Шоэном (Alan Schoen) из NASA в 1970 г., который подыскивал ультралёгкий и прочный материал для космических аппаратов. Поверхность гироида описывается уравнением $\cos x \sin y + \cos y \sin z + \cos z \sin x = 0$. Процесс сборки модели с такой МП из одинаковых фасонных частей тёмного и белого цветов показан на рис. 1, б.

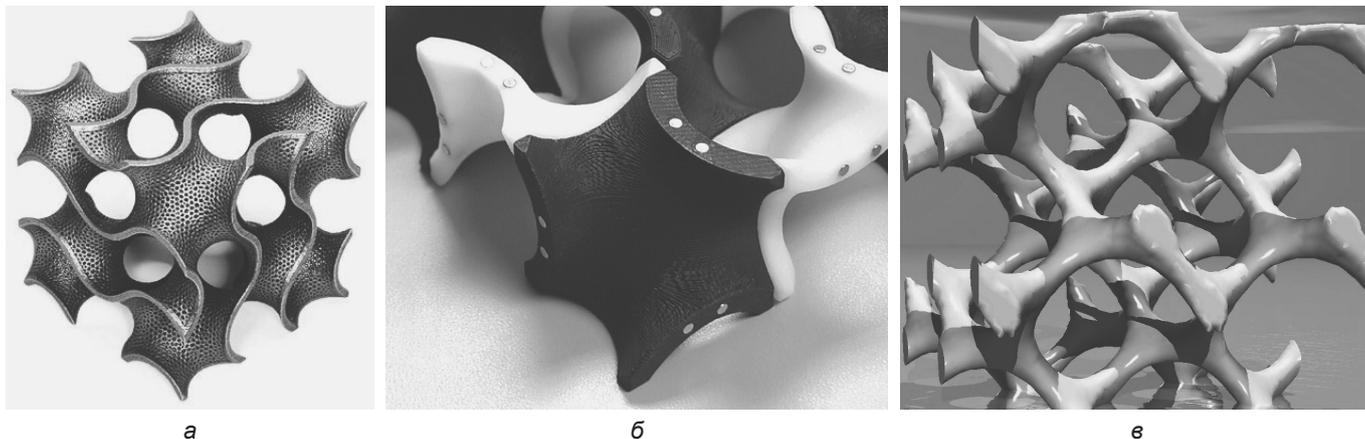


Рис. 1. Образцы конструкций с гироидной структурой: металлическая отливка (а), вариант сборки модели из одинаковых фигурных частей (б); структура полимера (в)

Тела с гироидной структурой присутствуют в клетках растений и животных, в отдельных блок-сополимерах при конденсации олигомеров. Узоры на разбухших от воды ладонях учёные объясняют гироидной организацией «скелета» этих складок из волокон кератина, которые в коже уложены так, как будто они находятся в полостях гироида. Макет такой гироидной структуры [6] показан University of Ulm, Institute of Polymer Science.

Модель для отливки (рис. 1 а, б) получена сборкой из повторяющихся пластин в форме правильных шестиугольников с фасонной поверхностью, имеющей выпуклые и вогнутые части. Такие пластины можно назвать фундаментальными элементами, и их форма в виде правильного шестиугольника позволяет составить их из двух, трёх или шести частей, как повторяющихся элементов в сочетании с копиями их «зеркальных отражений». Модель с поверхностью гироида можно собрать практически без ограничения размера, используя лишь одного вида такие фундаментальные элементы. Для мелкосерийного производства пенопластовых моделей такие пластины или указанные их составные части можно выполнять плоскими и изгибать по методу, описанному в работе [7].

Литейная модель с МП при формовке взаимодействует с песком на минимальной площади трущейся о песок поверхности модели, что способствует равномерному уплотнению песка. Для разовых моделей наличие МП увеличивает количество вариантов их технологичного расположения в песке контейнерной формы без опасности получения незаполненных песком поднутрений и каналов. С уменьшением поверхности полости формы уменьшается площадь контакта заливаемого металла с этой поверхностью, через которую тепло от металла отводится в песчаную среду, что улучшает заполняемость формы металлом. По этим причинам теория МП эффективна для проектирования моделей литниково-питающих систем. Заоваленные очертания отливки снижают вероятность трещин от затруднённой усадки отливки.

В работах [4, 6, 8] указано, что модель гироида можно построить с помощью свободно распространяемой программы Surface Evolver, созданной Кеннетом Брэкке (Kenneth Brakke). Поиск поверхности минимальной площади (или суммарной энергии поверх-

ностного натяжения) – лишь простейшее приложение этой программы. С её помощью при проектировании отливок или оптимизации конструкции для повышения их технологичности для любого вида формовки можно строить «минимальные» поверхности с точки зрения более сложных функционалов. Такой функционал (энергия) может быть комбинацией энергии поверхностного натяжения, гравитационной энергии, энергии изгибающей деформации и т. п., а также произвольных, задаваемых пользователем, поверхностных интегралов. Это открывает возможность не только получить на компьютере чертёж модели с МП, но и МП в сочетании с заданными служебными характеристиками отливки. В частности, при ЛГМ такой чертёж может сразу подаваться на управляемый компьютером 3D-фрезер, который в автоматическом режиме изготовит из пенопластовых блоков литейную модель или модель её пресс-формы для последующего серийного производства литейных моделей или их частей с помощью автоклава или полуавтомата.

При проектировании отливок Surface Evolver может обрабатывать объекты с произвольной топологией, подчинённые разнообразным объёмным и граничным связям. Например, можно зафиксировать объём, охватываемый поверхностью (изопериметрические задачи), или контактный угол на линиях пересечения искомой поверхности с некоторой заданной поверхностью. Для поиска конфигурации с минимальной энергией эта программа использует метод градиентного спуска и служит одним из примеров программ, пригодных для построения МП и их сочетания с другими поверхностями при конструировании литейных моделей или литниковых систем для различных литейных процессов [9]. Аналитичность МП, каждая точка которых определяется в пространстве аналитической функцией, повышает технологичность проектирования и изготовления моделей, а также оснастки для них, контроля качества их и отливок по ним, а также последующей обработки отливок при выполнении этих процессов с помощью современного оборудования с программным обеспечением.

В развитие темы использования МП для литья легковесных сотовых металлоизделий предложена конструкция модели по аналогии со структурой пены [5, 9]. Для её конструкции использовали

геометрические правила, описанные бельгийским учёным Ж. Плато, и определяющие строение пены как самопроизвольно образуемой природной структуры. Законы Плато справедливы для МП мыльных плёнок, образующих пену. Минимизация общей поверхности в этом случае означает минимизацию полной поверхностной энергии для пены заданного объёма. Для унификации деталей получаемой модели приняли, что стенки всех пузырьков должны быть одинаковыми.

На рис. 2 показан пример участка литейной разовой пенополистирольной модели, подобной типичной ячейке монодисперсной пены в виде многогранника пентагонального додекаэдра с открытыми сквозными полостями 1, расположенными в каркасе из ребер 2 этих ячеек [9]. Ребра 2 представляют собой взаимосвязанную систему, в которой в одной точке 3 сходятся по четыре ребра. Если в каждом ребре многогранника-ячейки пены сходятся три плёнки, углы между которыми равны и составляют 120° , то при построении модели в базовом варианте на гранях многогранника плёнку не выполняют, оставив одни рёбра и получив из них каркас. Согласно правилам Плато рёбра представляют собой взаимосвязанную систему, пронизывают весь каркас пены и при схождении четырёх рёбер в одной точке образуют по всей пене одинаковые углы $109^\circ 28'$. Площадь поперечного

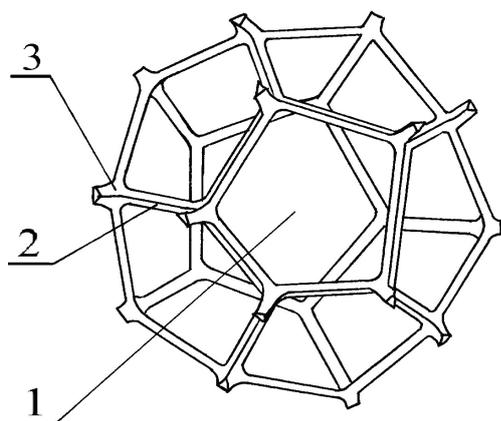


Рис. 2. Модель в виде пентагонального додекаэдра: 1 – открытые сквозные полости; 2 – ребро; 3 – точка соединения четырёх рёбер

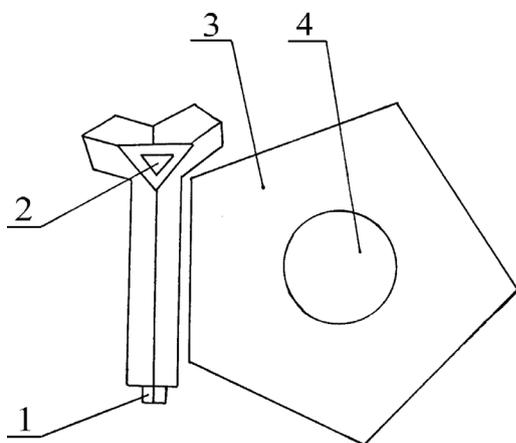


Рис. 3. Повторяющийся элемент модели для сборки каркаса рёбер: 1 – шип; 2 – паз; 3 – шаблон; 4 – отверстие



Рис. 4. Обложка журнала Nature со схемой структуры в виде додекаэдров [10]

сечения треугольного ребра (канала Плато) определяется как $S = r^2(3^{1/2} - \pi/2)$, где r – средний радиус пузырька газа (в наших расчётах – шара, вписанного в многогранник-ячейку модели).

На рис. 3 показан пример повторяющегося элемента для сборки каркаса из треугольных рёбер с использованием соединения «шип-паз». Этот элемент, как и другие части модели, может быть выполнен из пенополистирола, льда, парафина и других материалов для разовых литейных моделей. Для засыпки формовочного песка по крайней мере одно отверстие пятиугольного сечения в каждой или в некоторых из ячеек оставляют открытым, а остальные или по крайней мере одно при сборке модели могут закрывать пластинами 3, или плёнками, расположенными между угловыми рёбрами треугольных в сечении рёбер. Рядом с элементом-ребром на рис. 3 показана плоская пластина 3, которая крепится к рёбрам и закрывает пятиугольное отверстие (грань ячейки) или может быть выполнена в качестве шаблона, вокруг которого собирают в пятиугольник рёбра. В торце пластина 3 может иметь по периметру клинообразную борозду, по которой удобно ориентировать рёбра или крепить её к рёбрам, а также может иметь отверстие 4 круглой или другой формы и в заданном количестве. Аналогично пластине может использоваться плёнка для закупоривания пятигранного отверстия.

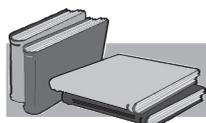
Таким выборочным закрыванием граней при сборке модели можно регулировать проницаемость металлической конструкции. Если требуется продувать, например, воздухом ячеистую конструкцию в одном прямолинейном направлении (а в других направлениях проход не желателен), то по две (противоположные) грани в каждой ячейке, имеющих в этом направлении наибольшее проходное сечение, выполняют открытыми, а все остальные закрытыми. Полным или частичным закрыванием отдельных граней можно создавать различную траекторию движения газа или жидкости в порах ячеистого материала. Причём закрываться грани ячеек могут пластинками из металла, частично вставленными в тела рёбер модели. После заливки и замещения металлом модели или полости от модели металл рёбер охватывает металл пластинок или сплавляется с ним.

Завершая тему о пеноподобных конструкциях, изучив целый ряд литературы о них, можно отметить следующее. На рубеже XX-XXI веков было сделано важное открытие в области экспериментальной астрофизики. Результаты наблюдений, выполненные с помощью космической станции с аппаратурой WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), свидетельствовали в пользу того, что Вселенная может иметь форму додекаэдрического пространства в виде сложной структуры из сотен додекаэдров, которую можно свести к топологически эквивалентной, состоящей всего из одного-единственного додекаэдра. Или, другими словами, Вселенная может представлять собой набор додекаэдров, как показано на рис. 4 (из иллюстрации к статье в журнале Nature [10], вынесенной на титульную страницу номера этого журнала). Если по этим данным строение Вселенной можно моделировать пеноподобной структурой, то и такого рода модели рукотворных отливок имеют потенциал применения в легковесных конструкциях.

К теме проектирования легковесных отливок с МП близок метод моделирования с помощью висячей цепи, принимающей форму цепной линии (катенарии), которая описывается математическим уравнением и, будучи перевернута, образует линию действия сил безмоментной арки. Вращением этой линии вокруг оси получают одну из простейших МП – катеноид. По

аналогии моделирования с помощью катенарии физическое моделирование оболочковых конструкций висячими сетями из нитей, а также таких конструкций на примере отливок методом провисания нагретой термопластичной плёнки описано в работе [11].

Таким образом, в развитие работ [3-7, 9] предложены примеры проектирования литых легковесных конструкций как перспективного направления по расширению существующего спектра металлопродукции в виде ячеистых отливок, предполагаемый вес которых будет на 50-90 % легче компактных изделий. Этому направлению металлосберегающего литья способствует совершенствование 3D-технологий моделирования и литья, что показано на примерах трансформации традиционных отливок в ячеистые конструкции [2]. Являясь примером технологизации науки, применение в литейном процессе разовых моделей с МП обеспечит взаимодействие их поверхности с песком (а металла с поверхностью формы) с минимальной энергией трения. При формовке в контейнере практически их любое положение даст четкий отпечаток на хорошо уплотнённом вокруг них песке, а отсутствие угловатости улучшит заполняемость формы металлом. Принцип МП также эффективен при конструировании литниковых систем и прибылей, для которых важна минимальная теплоотдача от металла в песчаную среду.



ЛИТЕРАТУРА

1. По материалам IKB Deutsche Industriebank. Литейная промышленность в 2020 г.: тенденции и вызовы // Литейное производство. – 2015. – № 9. – С. 35-39.
2. *Дорошенко В. С.* 3D технологии изготовления отливок как примеры аддитивного производства / В. С. Дорошенко // Металл и литьё Украины – 2014. – № 12. – С. 4-9.
3. *Дорошенко В. С.* Минимальные поверхности литых конструкций: материалы Международной научно-практической конференции «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология». 12-14.12.2011. – К.: ФТИМС НАНУ. – С. 94-96.
4. Патент 82028 України, МПК В22С 7/02. Ливарна модель / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. – Опубл. 2013, Бюл. 14.
5. *Дорошенко В. С.* Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям / В. С. Дорошенко // Литейное производство. – 2008. – № 9. – С. 28-32.
6. *Дорошенко В. С.* Математическое проектирование каркасно-ячеистых отливок / В. С. Дорошенко // Там же. – 2013. – № 2. – С. 9-12.
7. *Дорошенко В. С.* Створення технологічних виробів оптимальним заповненням простору каркасними литими металоконструкціями / В. С. Дорошенко, В. П. Кравченко, О. В. Муль // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2010. – Т. 15. – № 3. – С. 29-35.
8. *Мешков В.* Минимальные поверхности и Surface Evolver Кеннета Брэкке / В. Мешков // Вестник молодых учёных. – 2004. – № 1. – С. 84.
9. Патент № 87782 України, МПК В22С 7/00. Литейная одноразовая модель / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко. – Опубл. 2009, Бюл. № 15.
10. *Luminet J.-P., et al.* Dodecahedral space topology as an explanation for weak wide-angle temperature correlations in the cosmic microwave background // Nature, 9 October 2003, vol. 425. – P. 593-595.
11. *Дорошенко В. С.* Моделирование отливок как оболочковых конструкций с целью металлосбережения / В. С. Дорошенко, В. О. Шинский // Металл и литьё Украины – 2015. – № 6. – С. 30-34.

Анотація

Дорошенко В. С.

Аналіз та ідентифікація литих легковагових металоконструкцій з використанням теорії мінімальних поверхонь

Застосування ливарних моделей з мінімальною поверхнею забезпечить взаємодію їх поверхні з піском (а металу – з поверхнею форми) з мінімальною енергією тертя. При формуванні в опоці практично їх будь-яке положення дасть чіткий відбиток на добре ущільненому навколо них піску, а плавність поверхонь поліпшить ступінь заповнення форми металом. Принцип мінімальної поверхні також ефективний при конструюванні систем ливників і надливів, для яких важлива мінімальна тепловіддача від металу в піщане середовище.

Ключові слова

виливки, конструювання, лиття за газифікованими моделями, мінімальна поверхня, заощадження металу, комірчасті конструкції

Summary

Doroshenko V.

Analysis and identification of cast lightweight metal structures using minimal surfaces theory

Use of foundry patterns with minimal surface will provide the interaction between their surface with sand (and metal with mold surface) with a minimal friction energy. During their formation in the flask any their position will give a sharp imprint on the well packed sand around, and the absence of angularity will improve filling degree of the metal mold. Minimal surface area principle is also efficient for designing the gating systems and heads, when the minimal heat transfer from metal to sand is important.

Keywords

casting, designing, Lost Foam casting, minimal surface, metal salvage, cellular structures

Поступила 18.09.2015

Ежемесячный научно-технологический журнал

«Металл и литьё Украины»

предлагает разместить на своих страницах рекламу:

новых технологий; оборудования и изделий; методик и материалов;

предлагаемых товаров и услуг;

информацию об обучении, выставках, конференциях

и другую полезную информацию.