

# ДАВАЙТЕ ЛИТЬ МЕТАЛЛ, КОПИРУЯ СТРУКТУРЫ ВСЕЛЕННОЙ!

**Skeleton and cellular metal structures and materials may be cast by gasified foam models, by making them on analogues of animate and inanimate nature. Such products are considered to materials of the future. They are 50-90% lighter than compact materials and significantly enhance the properties of the metal products.**

Каркасные и ячеистые металлические конструкции и материалы возможно отливать по газифицируемым пенопластовым моделям, выполняя их по аналогам из живой и неживой природы. Такие изделия относят к материалам будущего. Они расширяют свойства металлопродукции, поскольку на 50-90% легче компактных материалов. Их потенциал применения – несущие, армирующие, изолирующие, ограждающие, демпфирующие удары конструкции, способные взаимодействовать с объемом или потоком вещества / энергии. Они применимы для очистки газов, жидкостей, глушителей шума, датчиков систем давлений, взрыво- и пламяпреградителей, адсорбционных, акустических, отопительных, теплообменных устройств, элементов источников тока, катализаторов, электродов, для сверхлегких конструкций, в том числе для летательных и космических аппаратов, и как костяк для композиционных материалов.

## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЛГМ

Современное литейное производство ориентируется на существенное снижение металлоемкости изделий. В свете этой тенденции наблюдается динамичное расширение способа литья по газифицируемым моделям (ЛГМ-процесс), когда пенопластовая модель в форме из сухого песка замещается расплавленным металлом и образует высокоточную отливку. При ЛГМ исключается применение связующих для песка, а прочность формы достигается за счет вакуумирования - перепад атмосферного давления и внутриформенного разрежения прессует форму, отводя газы из формы без выделения дыма в атмосферу цеха.

Институт ФТИМС НАН Украины (отдел формообразования под рук. проф. Шинского О.И.), в течение последних десятилетий совершенствующий технологию ЛГМ, спроектировал и запустил ряд цехов в России, поставил и внедрил базовое техническое оборудование производительностью 100 - 5000 т/год [1] в Польше и Вьетнаме, из последних объектов - цех на 400 т/месяц в г. Днепрпетровске.

Производственный потенциал технологии ЛГМ относительно создания новых материалов и конструкций далеко не исчерпан. Исключительная легкость обработки пенопластов, особенно с совершенствованием и удешевлением 3-D фрезеров (вплоть до настольных), которые с экрана компьютера вырезают из плиты пенопласта все, что изображено на экране монитора. Это позволяет не только бы-

стро получить модель отливки, но и сразу модель пресс-формы с автоматическим учетом припусков и размеров нескольких технологических переделов.

С другой стороны машиностроение для упаковочной промышленности создало большую гамму высокопроизводительных пластавтоматов для получения по указанным пресс-формам любых серий пенопластовых моделей. Быстрое изготовление пенопластовой модели сочетается с высокой текучестью сухого песка, который при изготовлении песчаной литейной формы во время уплотнения вибрацией за 1-2 минуты заполняет вокруг модели ее мельчайшие фигурные каналы и поверхности.

## НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Ряд открытий последних лет существенно расширил возможности литейного производства. Ярким примером тому служат проведенные в Германии работы по изготовлению стальной пены литьем по выжигаемым моделям в формах со связующим [2]. Результаты этих работ, фотографии пенополиуретановой пены с открытыми порами размерами до 2,5 мм

(рис. 1 а), служащей выжигаемой моделью для литья стальной пены, а также образцы литой пены из нержавеющей стали 316L с размером ячейки 20, 45 и 60 ppi (рис. 1 б.) и трубчатые теплообменники со стальной пеной (стальс 316L) с ячейкой размером 20 ppi (рис. 1 в.) можно найти в ежегодном отчете института (Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research (IFAM), Dresden) за 2005 г. на сайте [www.ifam-dd.fraunhofer.de/fhg/Images/jb2005\\_en\\_tcm280-110994.pdf](http://www.ifam-dd.fraunhofer.de/fhg/Images/jb2005_en_tcm280-110994.pdf).

В этих работах отмечается, что ячеистые материалы расширяют существующий спектр свойств, так как они на ~50-90% легче компактных материалов, а стальная пена имеет минимальную пористость ~80% и высокую для данного уровня пористости конструкцион-

ную прочность и жесткость. Однако надо отметить, что промышленное использование полиуретановой пены, как указано в работе [2], в качестве модели с размером пор не выше 2,5 мм, по нашему мнению, ограничивает размеры получаемой металлической пены как ячеистого материала, кроме того, на ней трудно стабильно получить одинаковые функциональные свойства, так как проницаемость двух одинаковых образцов различна.

## ТЕХНОЛОГИЯ В РАЗВИТИИ

Оценив технические возможности изготовления такой пены и сотовых конструкций в отечественных условиях, мы разработали ряд новых моделей для ЛГМ, поскольку описанный в указанной работе [2] процесс ее получения имеет длительные энергоемкие операции: (выжигание модели, прокалывание формы).

Получить полиуретановую пену со стабильными размерами ячеек и толщиной перегородок затруднительно. Как и пролить тонкие перегородки пены без спекания металла с формовочной смесью со связующим, это может нарушить однородность структуры металлической пены. В отличие от указанной технологии [2] во ФТИМС в настоящее время созданы и патентуются варианты литья металлов с открытой пористостью в вакуумируемые формы из сухого песка без связующего

по пенопластовым моделям. Модели выполнены в виде пространственных решеток, в частности, напоминающих изображение кристаллических решеток в кристаллографии (рис. 2). При этом участки между узлами ячеек литейной модели заполнили перемычками (перегородками), а сами узлы стали служить соединениями или скрещиваниями перемычек.

Для кристаллических решеток по канонам кристаллографии характерна трехмерная периодичность: определив структуру одной элементарной ячейки, можно построить всю решетку, например, используя простую геометрическую операцию параллельного переноса.

Модель участка двумерной «сетки» таких решеток с одним рядом вертикальных перемычек удобно выполнить в пресс-форме с плоским разъемом. При этом получаются элементы одной конструкции, из которых путем склеивания в стопке (повторением в решетке) набирают пространственную решетчатую конструкцию. Размеры пор-отверстий полу-

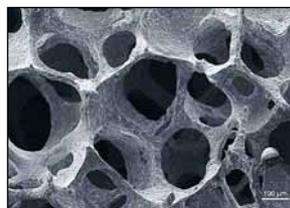


Рис. 1а. Пенополиуретановая пена со сквозными порами (увеличено), размер ячейки до 2,5 мм.



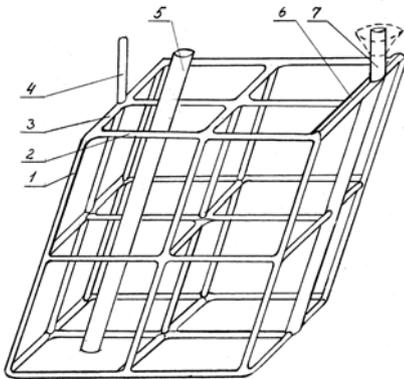
Рис. 1б. Образцы литой пены из нержавеющей стали 316L с размером ячейки 20, 45 и 60 ppi.



Рис. 1в. Трубчатые теплообменники со стальной пеной (сталь 316L, ячейка шириной 20 ppi).

чаемого литого материала могут быть до десятков и больше миллиметров, тогда как размеры ячеек решеток кристаллов, используемых как прообразы для пенопластовых моделей, составляют порядка десятых нанометра.

Если размеры ячеек позволяют, то можно ввести в пространство между перегородками пористые непроницаемые для песка трубопроводы. Подключение этих трубопроводов к вакуумному насосу улучшает заполнение формы металлом, стимулируя эффект вакуумного всасывания расплава, который позволит предотвратить недоливы формы и значительно увеличить размер литой конструкции, даже тонкостенной.



**Рис. 2. Модель пространственной решетки.**  
1, 2 и 3 – перемычки а, в, с, 4 – выпор, 5 – пористый трубопровод, 6 – шлакоуловитель, 7 – стояк.

Пример такой модели (рис. 2) показан в виде пространственной решетки, где есть одинаковые элементарные три детали - перемычки 1, 2 и 3, которые обо-

значаются буквами а, в, с. Они составляют элементарную ячейку как трехмерное образование. Путем продолжения одного из рядов перемычек выполнен выпор 4. На определенном расстоянии от перемычек при последующей засыпке песком может быть установлен пористый трубопровод 5, ряд утолщенных перемычек может служить шлакоуловителем 6 при запертой литниковой системе, а другой ряд утолщенных перемычек - стояком 7 (место установки литейной воронки показано пунктиром).

### В СОГЛАСИИ С ПРИРОДОЙ

Изображать внутреннюю структуру кристалла в виде пространственной сетки, узлы которой совпадают с центрами частиц в кристалле (то есть решетками), начал с 1848 года О. Браве. Он предложил 14 решеток Браве, которые легли в основу кристаллографии и отличаются один от другого набором элементов симметрии, или сингонией, и типом центрирования.

При изготовлении модели решетки, подобной изображению на рис. 2, повторяющиеся элементы из пенополистирола получают спеканием в пресс-форме или вырезанием из блока (в единичном производстве). Такое выполнение модели гарантирует получение сквозных пор или полостей, которые заполняют сухим песком при формовке. Для изготовления в заданном месте пористой модели монолитного участка или стенки этот участок или несколько перемычек обматывают синтетической пленкой, предотвращая доступ песка в эту зону модели, заполняемую впоследствии металлом.

Каждая из пор литого материала, полученного по таким моделям, имеет точные

стабильные размеры, форму, пространственную ориентацию в материале, периодичность повторения, толщины стенок и перемычек (в отличие от полиуретановой пены), поскольку модель выполняется по чертежам и изготавливается чаще всего в точной металлической пресс-форме предпочтительно на пластавтоматах. Расширению служебных свойств материала будет способствовать, например, введение в его поры при сборке модели вставок из другого материала, которые остаются в литой конструкции. Полости и перемычки литого материала могут выполняться различных размеров и форм, с разным их чередованием. Прочностные характеристики материала будут иметь некоторую корреляцию с параметрами кристалла, кристаллическая решетка которого копируются, а металл литых тонких (3...8 мм) перемычек, как правило, в 1,2...1,4 раза прочнее, чем толстостенных (15...40 мм) из-за образования в тонких телах преимущественно мелкозернистой структуры.

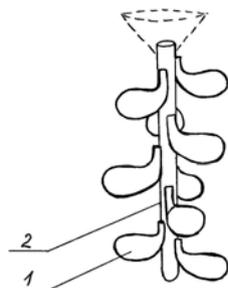
В отдельных случаях некоторые или все перемычки литого материала могут выполнять криволинейными, например S-образными, а стенки неплоскими. Такое «улучшение структуры» копируемых природных конструкций при создании наших материалов повышает их служебные свойства, когда важно достичь большой удельной площади поверхности при применении их для электродов, теплообменников, катализаторов и т. п. Для сборки нескольких литых каркасных деталей в одну конструкцию на свободных концах перемычек этих деталей могут быть выполнены литьем средства монтажа либо предусмотрена возможность сваривания, в том числе, с

изделиями из проката. Оптимизация пространственных литых конструкций и размещения одноразовых моделей в объеме песка – один из резервов новых возможностей, свойственных «объемной» формовке при ЛГМ, в отличие от формовки с плоскостью разреза, присущей традиционным видам литья в парных опоках. Это преимущество ЛГМ прежде всего используют для мелких отливок при сборке одноразовых моделей из элементов в стопки или «кусты» с одновременным формированием коллектора литника как несущей конструкции, чем в 1,5...2 раза увеличивают металлоемкость формы.

С целью повышения качества и служебных возможностей пространственных отливок, а также отливок, заливаемых в виде блоков или «кустов», предложено модельные конструкции собирать по принципу ботанического явления филлотаксиса (буквально - листорасположения). Например, при спиральном филлотаксисе из-за одинакового угла между соседними листками (около  $137,5^\circ$ ) ни один лист не затеняет другой. [3]. При этом природные, созданные из повторяемых элементов симметричные структуры, в которых четко прослеживаются числовые закономерности [4], подтверждают слова В.И. Вернадского о неевклидовой геометрии живой природы [5].

### ПРИМЕРЫ ПОЛУЧАЕМЫХ СТРУКТУР

На **рис. 3** показан пример модели в виде отдельных элементов **1** (или моделей отдельных деталей), закрепленных на стояке **2** (коллекторе литника). Стояк и элементы выполняются из пенопласта. Модель на **рис. 2** может представлять конструкцию, которую в литом виде используют целой, например, как армирующую, или быть блоком из отдельных закрепленных на стояке деталей, которые после отливания из металла отделяют от стояка. Воронка стояка показана пунктиром.

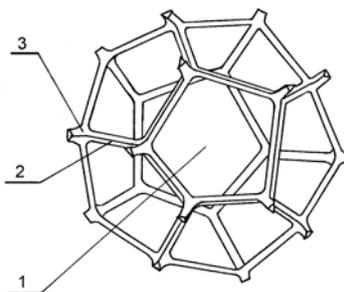


**Рис. 3.** Модель. **1** - элемент (модель детали), **2** - стояк (коллектор литника)

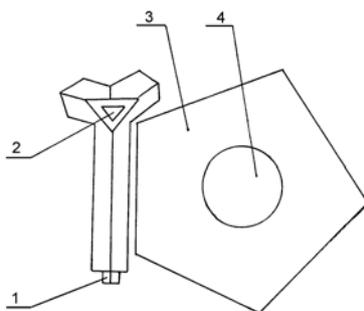
Подобно образованию в пространстве листовой мозаики наиболее рациональное размещение модельных элементов **1** (**рис. 3**) как в целостной пространственной конструкции, так и деталей на коллекторе, позволит равномерно расположить элементы модели в вакуумированном песке формы. Равномерность вакуумирования повышает качество отливок при улучшении режима эвакуации из формы продуктов газификации моделей, оптимизирует

газовое давление как в песке, так и над зеркалом металла во время заполнения формы, уменьшает вероятность образования дефектов на полученной отливке. Охлаждение равномерно размещенных в объеме песка отливок или их частей также способствует повышению стабильности их свойств.

Возвращаясь к теме литья сотовых металлических пространственных структур в виде крупноячеистой пены, рассмотрим конструкцию модели из повторяемых элементов, разработанную во ФТИМС. В этой конструкции использованы геометрические правила, описанные бельгийским ученым Ж. Плато и определяющие структуру пены как самопронизывающуюся природной структуры [6].



**Рис. 4.** Модель в виде пентагонального додекаэдра. **1** – открытые сквозные полости, **2** – ребро, **3** – точка соединения четырех ребер.



**Рис. 5.** Повторяющийся элемент модели для сборки каркаса ребер. **1** – шип, **2** – паз.

На **рис. 4** показан пример участка литой одноразовой (пенополистироловой) модели подобной типичной ячейке мнотдисперсной пены в виде многогранника пентагонального додекаэдра с открытыми сквозными полостями **1**, расположенными в каркасе из ребер **2** этих ячеек. Эта ячейка модели аналогична мелкоячеистой модели из пенополиуретана (**рис. 1а**). Ребра представляют собой взаимосвязанную систему, в которой в одной точке **3** сходятся по четыре ребра. Если в каждом ребре многогранника-ячейки пены сходятся три пленки, углы между которыми равны и составляют  $120^\circ$ , то при построении модели в базовом варианте на гранях многогранника пленку не выполняют, оставив одни ребра и получив из них каркас.

Согласно правилам Плато ребра представляют собой взаимосвязанную систему, пронизывают весь каркас пены и при сходимости четырех ребер в одной точке образуют по всей пене одинаковые углы  $109^\circ 28'$ . Площадь поперечного сечения тре-

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

На **рис. 5** показан пример повторяющегося элемента для сборки каркаса из треугольных ребер с использованием соединения «шип-паз», шип **1** и паз **2**. Этот элемент, как и другие части модели, может быть выполнен из пенополистирола и других материалов для удаляемых одноразовых литых моделей. Для засыпки формовочного песка по крайней мере одно отверстие пятиугольного сечения в каждом или в некоторых из ячеек выполняют открытым, а остальные или по крайней мере одно при сборке модели могут закрывать пластинами или пленками, расположенными между угловыми ребрами треугольных в сечении ребер. На **рис. 5** рядом с элементом-ребром показана плоская пластина **3**, которая крепится к ребрам и закрывает пятиугольное отверстие (грань ячейки) или может быть выполнена для использования в качестве шаблона, вокруг которого смыкаются в пятиугольник ребра. В торце пластина **3** может иметь по периметру клинообразную борозду, по которой удобно ориентировать ребра или крепить ее к ребрам, а также может иметь отверстие **4** круглой или дуглой формы и в заданном количестве. Аналогично пластине может использоваться пленка для закупоривания пятигранного отверстия.

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

### МАТЕРИАЛЫ БУДУЩЕГО

Завершая тему о пенообразных конструкциях, процитируем информацию из Википедии (<http://ru.wikipedia.org>): «Результаты наблюдений в августе 2006 года во время нанесения на карты областей распределения темной материи в скоплении галактик Cl 0024+17 (ZwC10024+1652) свидетельствуют о том, что Вселенная представляет собой набор бесконечно повторяющихся додекаэдров» [7]. Если галактики обладают пеноподобной структурой, о чем также писал в журнале «Nature» Джеффри Виск, то и нам не грех «взять на вооружение» подобные конструкции, которые удобно получать литьем из металлов и сплавов.



**Рис. 6. Модель детали колосника печи.**



**Рис. 7. Решетки ливнеприемников и канализационных систем, которые льют в стопках.**

Предложенные модельные конструкции из элементов допустимых размеров от нескольких до сотен миллиметров и более с возможностью получения их деталей на пластавтоматах упростят конструирование ячеистых материалов, которые обычно называют материалами будущего и в описанном случае подобны пенным конструкциям, в том числе твердой пене с регулируемой структурой. На фотографии (рис. 6) в качестве примера применения пористых отливок показана модель кольцеобразной детали диаметром около 600 мм, которая имеет сквозные отверстия конусной формы по всему своему телу, тем самым представляя собой относительно простой вариант пористой конструкции. Диаметры одинаковых конусных отверстий имеют размеры: максимальный 5 мм, минимальный 2 мм. Эта деталь служит колосником промышленной печи для сжигания сухой соломы и камыша как альтернативных источников энергии. Выливание таких деталей другими способами, кроме ЛГМ, со сравнимой экономичностью, практически невозможно.

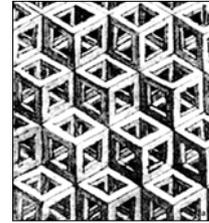
На рис. 7 показана слева решетчатая конструкция отливки, которую удобно собирать в пространственную решетку

из моделей, 4 модели из пенополистирола показаны справа. Такую отливку из легированного чугуна получают в виде единой стопки решеток из десятка штук, стопка имеет высокую жесткость и дает при литье стабильные размеры отдельных плоских решеток, а также оптимально заполняет литейную форму по объему до максимального числа отливок в ней. Затем стопку разрезают на отдельные плоские решетки для ливнеприемников и канализационных систем.

Пространственные решетчатые конструкции имеют «магнетическую способность» притягивать внимание многих конструкторов и архитекторов. Может быть, для того и рисовали еще Леонардо да Винчи (рис. 8), голландский художник-график Мауриц Эшер (рис. 9) свои «заораживающие» воображение пространственные решетки, чтобы мы могли разработать такую технологию их изготовления, как литье, обладающее возможностью «объемной» формовки.

Ячеистые пространственные материалы, полученные методом ЛГМ, расширяют существующий спектр свойств по сравнению с компактными материалами. А литые решетчатые материалы, аналоги которых взяты из макро- и микромира живой и неживой природы, из сборных модельных элементов упростят конструирование и позволят наладить выпуск ячеистых материалов и каркасных легких изделий, которые часто называют «материалам будущего».

**В.С. Дорошенко**  
**dorosh@inbox.ru**  
**Физико-технологический институт**  
**металлов и сплавов НАН Украины, Киев**



**Рис. 8. Рисунок Леонардо да Винчи.**



**Рис. 9. Рисунок художника Эшера.**

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Дорошенко В. С. Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям. - Литейное производство. - 2008. - №9. - С. 28-32
2. Моуала Х. и др. Стальная пена с открытыми порами – изготовление и свойства. Металлургия машиностроения, 2006, №6. С. 29-33.
3. Патент Украины 83447 МПК В22С7/00, В22С 9/00.- Оpubл. 2008, Бюл. № 13. Литейная одноразовая модель / Шинский О.И., Дорошенко В.С.
4. Боднар О. Я. Геометрія філотаксиса. – Доповіді АН України. – 1992. – № 9. С. 9-14.
5. Вернадский В. И. Размышления натуралиста. Пространство и время в неживой и живой природе. – М.: Наука, 1975. – 220 с.
6. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. – М.: Химия, 1983. С. 6, 7.
7. <http://ru.wikipedia.org/>