



*Каркасные и ячеистые металлические конструкции и материалы предлагается отливать по газифицируемым пенопластовым моделям, выполняя их по аналогам из живой и неживой природы. Такие изделия относят к материалам будущего, они расширяют существующий спектр свойств металлопродукции, поскольку на 50-90% легче компактных материалов, имеют потенциал применения в конструкциях, взаимодействующих с объемом или потоком вещества или энергии, а также как костяк для армированных и композиционных материалов.*

Современное литейное производство, как один из древнейших видов обработки металлов, ориентируется на существенное снижение металлоемкости изделий. В свете этой тенденции наблюдается динамичное распространение в мировой практике способа литья по газифицируемым моделям (ЛГМ-процесс), когда пенопластовая модель в литейной форме из сухого песка замещается расплавленным металлом и образует высокоточную отливку. При ЛГМ, как правило, не применяется связующее для песка, а прочность литейной формы достигается ее вакуумированием, которое уплотняет песок формы за счет перепада атмосферного давления и внутриформенного разрежения, а также отводит газы из формы без попадания дыма в атмосферу цеха.

Институт ФТИМС НАН Украины в течение последних десятилетий совершенствует технологию в ее различных вариантах, а также поставляет для ЛГМ комплекс базового технологического оборудования при организации или реконструкции литейных цехов производительностью 100–5000 т/год [1].

Производственный потенциал технологии ЛГМ относительно создания новых материалов и конструкций далеко не исчерпан, сотни

# Металлические ячеисто-каркасные отливки по аналогам из живой и неживой природы

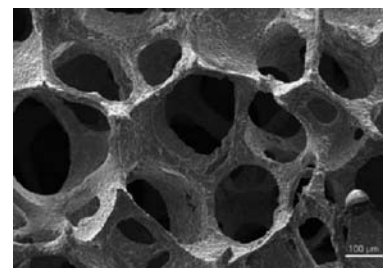
**Владимир Дорошенко, к. т. н.,** Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

патентов, чаще всего компаний – мировых лидеров машиностроения, ежегодно пополняют Интернет сайты новой патентной документацией. Исключительная легкость обработки пенопластов, особенно с совершенствованием и удешевлением 3-D фрезеров (вплоть до настольных), которые вырезают из плиты пенопласта все, что изображено на экране подключенного к ним компьютера (аналогично действию принтера, только при создании объемного «изображения»), позволяет не только быстро получить модель отливки, но сразу и модель ее пресс-формы с автоматическим учетом припусков и размеров нескольких технологических переделов.

Если отливку пресс-формы из алюминия поставить на 3-D фрезер, он проверит ее размеры и механообработкой доведет до требуемой точности и чистоты поверхности.

К сказанному добавим, что машиностроение для упаковочной промышленности создало большую гамму высокопроизводительных пластавтоматов для получения по указанным пресс-формам любых серий пенопластовых моделей. К тому же быстрое изготовление модели сочетается с высокой текучестью сухого песка, который при изготовлении песчаной литейной формы во время уплотнения вокруг модели вибрацией или пневмопотоком подобно псевдожидкости заполняет мельчайшие фигурные ее каналы и поверхности. Причем такое уплотнение песка во время изготовления песчаной литейной формы обычно занимает 1–2 минуты.

В последние годы ЛГМ открывает спектр своих возможностей в области получения ячеистых изделий, что является перспективной расширением возможностей литейного



**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).

производства и основной темой этой статьи. Таким примером может быть проведенные в Германии работы по изготовлению стальной пены литьем по выжигаемым моделям в формах со связующим [2], о чем также указано в ежегодном отчете института (Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research (IFAM), Dresden) за 2005 г. На рис. 1а показаны фотографии пенополиуретановой

**Дорошенко Владимир Степанович.** 1955 г.р., кандидат технических наук, специалист в области литейного производства черных и цветных металлов. В настоящее время – старший научный сот рудник Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины (Киев). Подготовил и опубликовал 214 научно-технических работ по технологии изготовления литейных песчаных форм методом вакуумной формовки, литья по газифицируемым моделям, получения каркасно-ячеистых литых конструкций и др., в том числе имеет 15 Авторских свидетельств, выданных в СССР, 31 патент и 2 опубликованных заявки на изобретения в России, и 22 патента и 15 заявок на изобретения в Украине.

пены с открытыми порами размерами до 2,5 мм, которая служит выжигаемой моделью для литья стальной пены. А на рис. 16. можно видеть образцы литой пены из нержавеющей стали 316L с размером ячейки 20, 45 и 60 ppi. Трубчатые теплообменники со стальной пеной (стальс 316L) с ячейкой размером 20 ppi показаны на рис. 1в.

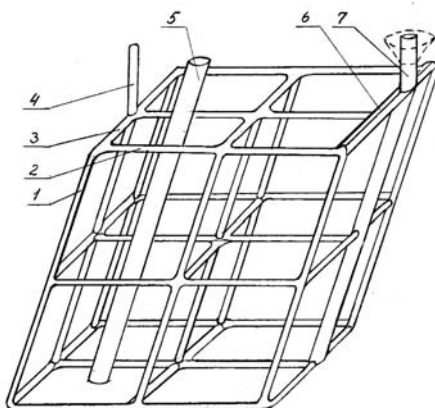
Ячеистые материалы расширяют существующий спектр свойств, так как они на ~50–90% легче компактных материалов, а стальная пена имеет минимальную пористость ~80% и высокую для данного уровня пористости конструкционную прочность и жесткость. Однако, промышленное использование полиуретановой пены, как указано 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, по ней трудно стабильно получать одинаковые функциональные свойства, проницаемость двух одинаковых образцов часто различна.

Оценив технические возможности изготовления такой пены и сотовых конструкций в отечественных условиях, в институте ФТИМС разработан ряд новых конструкций пенопластовых моделей для ЛГМ с последующей формовкой в сухом песке, поскольку описанный в работе [2] процесс литья имеет длительные энергоемкие операции (выжигание модели, прокаливание формы), подобные литью по выплавляемым моделям. Получение полиуретановой пены со стабильными размерами ячеек, толщиной перегородок затруднительно, так же, как пролить тонкие перегородки пены без опасности спекания металла с формировочной смесью со связующим, что может нарушить однородность структуры металлической пены. Первыми шагами во ФТИМС было получение образцов медной пены химическим нанесением меди на гранулы полистирола с последующим их выжиганием, но производство металлической пены и сотовых материалов литьем предпочтительнее с точки зрения промышленного внедрения.

Такие материалы имеют потенциал для применения как несущие, армирующие, изолирующие, ограждающие, демпфирующие удары конструкции, способные взаимодействовать с объемом или потоком вещества или энергии. Они применимы для очистки газов, жидкостей, глушителей шума, датчиков систем давления, взрыво- и пламяпреградителей, адсорбционных, акустических, отопительных, теплообменных устройств, элементов источников тока, катализаторов, электродов, в системах облегчения конструкций и как костяк для композиционных материалов.

Во ФТИМС в настоящее время созданы и патентуются пенопластовые литейные модели в виде пространственных решеток, в частности, напоминающих изображение кри-

сталлических 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.



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

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 получают элементы одной конструкции, из которых путем склеивания в стопке (повторением в решетке) набирают пространственную решетчатую конструкцию. Выполнение модели по указанному методу гарантирует получения сквозных одинаковых пор или полостей, минимальные размеры которых ограничены лишь возможностью их заполнения сухим песком в литейных формах. Размеры поротверстий получаемого 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.

Для литого ячеистого материала, составленного из указанных плоских решеток, полученных в пресс-формах, целесообразно применить все требования литейной технологии, в частности, выполнить на модели литейные радиусы, что позволит плавно залить металлом форму и увеличит жесткость конструкции, а лучшая заполняемость расплавом достигается по перемычкам цилиндрической формы, где минимизирована площадь теплоотдачи. Если размеры ячеек позволяют, то можно ввести в пространство между перегородками пористые непроницаемые для песка трубопроводы. Подключение этих трубопроводов к ва-

куумному насосу улучшает заполнение формы металлом, стимулируя эффект вакуумного всасывания расплава, который предотвратит недоливы формы и позволит значительно увеличить размер литой конструкции, даже тонкостенной.

Образец такой модели (рис. 2) показан в виде пространственной решетки, где есть одинаковые элементарные три детали – перемычки 1, 2 и 3, которые обозначаются буквами а, в, с. Они составляют элементарную ячейку как трехмерное образование, углы между ними обозначаются  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . 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 литейной системе, а другой ряд утолщенных перемычек – стояком 7 (место установки литейной воронки показано пунктиром).

Обращаясь к теме конструирования указанного ячеистого материала, отметим, что изображать внутреннюю структуру кристалла в виде пространственной сетки, узлы которой совпадают с центрами частиц в кристалле (то есть решетками), начал с 1848-го 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. В таблице указаны параметры, которые в совокупности с элементами симметрии, определяют элементарную ячейку для каждой кристаллографической системы. Эти 14 типов структур являются основными, но не исчерпывают всего многообразия пространственных решеток, описанных в кристаллографии. В примитивных кубических решетках атомы занимают позиции по вершинам куба. Элементарная ячейка кубической сингонии описывается параметром а ( $a=b=c$ , все углы между перемычками равны 90 градусов).

При изготовлении модели решетки (рис. 2) повторяющиеся элементы из пенополистиро-

Система решетки	Параметры элементарной ячейки
кубическая	$a=b=c$ , $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
тетрагональная	$a=b \neq c$ , $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
ромбическая	$a \neq b \neq c$ , $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
гексагональная	$a=b \neq c$ , $\alpha=\beta=90^\circ$ , $\gamma=120^\circ$
тригональная	1) $a=b \neq c$ , $\alpha=\beta=90^\circ$ , $\gamma=120^\circ$ 2) $a=b=c$ , $\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$
моноклинная	$a \neq b \neq c$ , $\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$
триклинная	$a \neq b \neq c$ , $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

**Таблица. Параметры решеток Браве.**

ла 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 в 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.

В отдельных случаях, во избежание образования трещин от напряжений, вызванных усадкой металла, некоторые или все перемычки литого материала могут выполнять криволинейными, например S-образными, а стенки неплоскими. Это улучшает служебные свойства тех материалов, для которых 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 в плоскости, присущей традиционному литью 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 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 и по принципу ботанического явления филлотаксиса (буквально - листорасположения) [3]. Это явление изучает раздел морфологии растений, согласно данному признаку листья размещаются на стебле в строго заданной последовательности. Наиболее распространен спиральный филлотаксис с одним листком на узле, когда одинаковый угол между соседними листками, близкий к значению  $137,5^\circ$ , создает структуру, когда ни один листок не затеняет других. 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].

На рис. 3 показан пример модели в виде отдельных элементов 1 (или моделей отдельных деталей), закрепленных на стояке 2 (коллекторе литника). Стояк 2 и элементы 1 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.

Подобно образованию в пространстве листовой мозаики, призванной улавливать растением как можно больше света, 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 повысит качество отливок при улучшении режи-

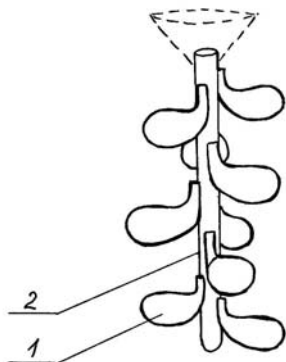


Рис. 3. Модель. 1 – элемент (модель детали), 2 – стояк (коллектор литника)

ма отсоса из формы продуктов газификации моделей, оптимизирует газовое давление как в песке, так и над зеркалом металла во время его заполнения формы, уменьшит вероятность образования дефектов при возможном скоплении углеродсодержащих продуктов 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, включая изготовление подобных пене материалов с регулируемой структурой и свойствами, рассмотрим конструкцию модели для них из повторяемых элементов, разработанную во ФТИМС. В этой конструкции использованы геометрические правила, описанные бельгийским ученым Ж. Плато, который определил структуру пены как самопроизвольно образуемой природной структуры [6].

На рис. 4 показан пример участка литейной одноразовой (пенополистироловой) модели подобной типичной ячейке монодисперсной 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, про-

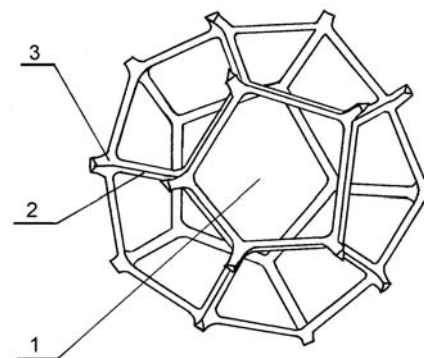


Рис. 4. Модель в виде пентагонального додекаэдра. 1 – открытые сквозные полости, 2 – ребро, 3 – точка соединения четырех ребер.

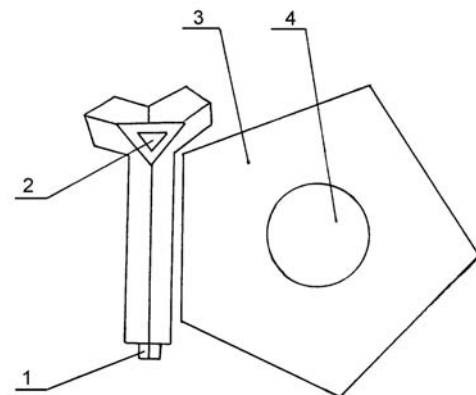


Рис. 5. Повторяющийся элемент модели для сборки каркаса ребер. 1 – шип, 2 – паз.

низируют весь каркас пены и при схождении четырех ребер в одной точке образуют по всей пене одинаковые углы  $109^{\circ}28'$ . Площадь поперечного сечения треугольного 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, других пористых пенопластов, льда, парафина и других материалов для удаляемых одноразовых литейных 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 3 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 дугой 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 прямолинейном 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 чем закрываться 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.

Завершая тему о пенообразных конструкциях, процитируем информацию из одной из энциклопедий Интернета «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 Викс, то и нам не грех «взять на вооружение» подобные конструкции, которые удобно получать литьем из металлов.

Предложенные новые 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 мо-



Рис. 6. Модель детали колосника печи.

дели 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, ко-



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

торые служат решетками 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), а также художник Эшер (рис. 9) свои «завораживающие» воображение пространственные решетки, чтобы мы могли разработать технологию их изготовления, например, способом ЛГМ.

Ячеистые пространственные материалы, полученные этим способом, расширяют существующий спектр свойств по сравнению с компактными материалами. А литые решетчатые материалы, в частности, 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 изделий, которые часто называют «материалами будущего». Также и ЛГМ по его потенциалу можно отнести к технологиям будущего,

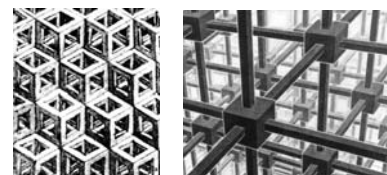


Рис. 8. Рисунок Леонардо да Винчи.

Рис. 9. Рисунок художника Эшера.

особенно полезным для немногочисленных стран с замкнутым металлургическим циклом, получающих металл из собственных руд и способных перевести его в высокотехнологичный наукоемкий товар. **МЗ**

#### 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. Геометрия филотаксиса. – 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.