УДК 621.744.072.2: 678.746.22-404.8

В. С. Дорошенко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Проблемы конструирования пространственных каркасных отливок для литья по газифицируемым моделям

Предложено каркасные и ячеистые металлические конструкции отливать по газифицируемым моделям. Описан ряд примеров таких отливок, выполненных по аналогам из живой и неживой природы. Эти изделия относят к материалам будущего, они расширяют существующий спектр свойств металлопродукции и имеют потенциал применения в конструкциях, взаимодействующих с объемом или потоком вещества (энергии), а также как костяк для армированных, композиционных материалов и внутренних холодильников слитков и фасонных отливок.

Ключевые слова: *отливка, литье по газифицируемым моделям, материалы будущего, ячеистые*

Технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ или Lost Foam Casting Process), используя размещение отливки или блока отливок в пространстве песка контейнерной песчаной формы, дает основание сформулировать задачу: «Какие пространственные конструкции литейщик может получать в объеме песка?», в противовес традиционной «Как поместить отливку в плоскости литейной формы?». Сегодня с помощью технологии ЛГМ можно изготовить литые изделия, имитируя природное распространение твердотелых конструкций в объеме газообразной или жидкой среды. Разработка проблем литых каркасно-ячеистых изделий и поиска способов оптимизации их конфигураций ведется путем «заимствования технических решений» у природы, поскольку природой «уже решены вопросы» покорения пространства конструкциями с чрезвычайно высоким уровнем ресурсосбережения.

Переход к проектированию литых металлоизделий в объеме песка формы значительно расширяет спектр их конфигураций, и, в частности, открывает новое направление литья сотовых, объемно-ячеистых, скелетно-решетчатых конструкций, материалов и блоков отливок, расширяя известные свойства традиционно применяемых не только литых, но и получаемых с их привлечением армированных и композиционных изделий. Отливки такого вида – это облегченные несущие, армирующие, изолирующие, ограждающие, демпфирующие удары конструкции, способные находиться в среде, пропуская (полностью или частично) через себя поток вещества или энергии. Они используются для отделения отходов при очистке газов, жидкостей, а также для глушителей шума, взрыво- и пламяпреградителей, теплообменных, адсорбционных, акустических устройств, элементов источников тока, катализаторов, кристаллизаторов, электродов (в т. ч. заземления) и как костяк для композиционных материалов.

В первых двух статьях [1, 2] в конструкциях отливок предложено использовать принципы строения: кристаллических решеток (как их изображают в кристаллографии); спиралевидного расположения листьев («филлотаксис» из ботаники); пены со сквозными порами и ячейками (из физико-химии), а также их закономерности; конструкций деревьев (включая «деревья» бронхов и кровеносных сосудов млекопитающих); микроструктуры аморфных металлов и структуру углеродных нанотрубок.

Такие же проблемы относятся к сфере исследований подраздела бионики – биомиметики (bios – жизнь, и mimesis – подражание) как подхода к созданию технических устройств, при котором идея и основные элементы устройства заимствуются из живой природы. Кроме того, часто в русле таких заимствованных идей создаются новые конструкции, не существующие в природе. Классическим примером метода биомиметики служит Эйфелева башня, при конструировании которой автор использовал описание костной структуры головки бедренной кости, выполненное швейцарским профессором анатомии Германом фон Мейером.

Создавая конструкции одноразовых моделей для получения пространственных отливок, среди отобранных эволюцией конструкций живой природы заметно нередкое использование спиральных элементов [3] с наличием таких закономерностей, как повторяемость и комбинаторность (фрактальность) форм природы. Известно использование указанных свойств в новых архитектурных строениях, в которых одним из конструктивных стилеобразующих элементов служит спиральная конструкция модели ДНК, предложенная Уотсоном-Криком и относящаяся к «морфологическим стандартам структур различных систем природы» [4]. В ряду рукотворных примеров заимствования этой конструкции – автомобильный музей Mercedes-Benz (построенный в Штутгарте, Германия, проект UN Studio van Berkel & Bos). В нем экспонаты расположены на двух спиралевидных пандусах, имитирующих цепь ДНК: они вьются, пересекая друг друга, сквозь восемь уровней здания. Архитекторы называют это здание «ДНК в бетоне».

Каркасное строительство показало, что спиральный каркас сетчатой оболочки здания значительно легче традиционного из прямых прутьев, его трудно сломать, так как он подобен пространственной пружине и отвечает на деформирующие нагрузки об-

* Статья отражает одну из тем научной школы проф. О. И, Шинского

ратимым восстановлением формы. Закономерности формообразования ДНК (как конструктивного стилеобразующего элемента на микроуровне, отобранном эволюцией и несущем разнообразие форм и функций органических существ), целесообразно копировать из металла для получения пространственных каркасных конструкций, арматуры композиционных материалов и армированных отливок. При конструировании литейной модели полный виток двойной спирали с шагом *l* можно рассматривать как ячейку. Ячеистые материалы удобно собирать при изготовлении пенополистироловой модели из повторяющихся элементов. Эти материалы обычно в несколько раз легче компактных материалов. В настоящее время появилась информация об обнаружении трехспиральной ДНК (такой вариант учтен в нижеописанной конструкции модели).

На рис. 1, *а* показан пример литейной одноразовой модели с пропорциями макета молекулы ДНК из книги [4]. Модель выполнена в форме винтовой лестницы с двумя остовами *1*, которые свиты вместе и закручены вправо в виде двойной спирали, и одинаковыми перекладинами *2*, расположенными перпендикулярно оси двойной спирали. При этом двойная спираль модели имеет диаметр $d = 2$, шаг витка – $l = 3{,}4$. Соотношение этих величин равно $l = 1{,}7d$. Число одинаковых перекладин на полный виток – 10. Каждая повернута на 36° относительно предыдущей и находится на расстояние 0,1*l* от нее. Форму спирали удерживает или фиксирует модель литниковой системы *3*, прикрепленная с помощью пайки или клея к остовам этой двойной спирали.

На рис. 1, *б* показаны четыре примера составных повторяющихся элементов, которые можно использовать для сборки модели. Эти элементы имеют столбики *1* высотой *h*, определяемой вдоль оси двойной спирали. Из столбиков *1* составляют остов, они закручены на угол $\alpha = 360° \, h/l$. Перекладины *2* могут быть S-образной формы как наиболее благоприятной для релаксации усадочных напряжений ячеистых отливок, а также в виде трех- или многоугольных пластин *3*, или перегородок *4* по периметру многоугольника. Показан также элемент из трехлучевых распорок *5*. Последние три элемента предназначены для трехспиральной модели.

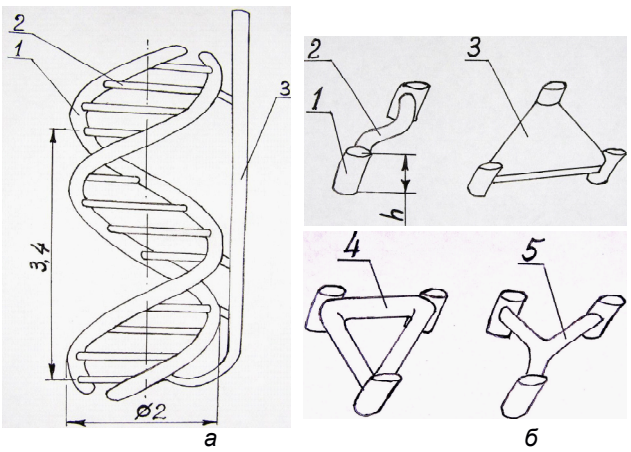


Рис. 1. Пенополистироловая модель (*а*) и варианты выполнения перегородок (*б*)

Повторяющиеся детали для конкретной модели бывают одного вида или между деталями *1* прокладываются столбчатые прокладки, чередуемые с элементами перекладин. Элементы могут быть собраны склейкой, пайкой встык (при этом применяются шаблоны, частично охватывающие снаружи стык столбиков *1* – рис. 1, *б*) и иметь соединение «штырь-паз» или др.

Составляющие элементы набирают нанизыванием на гибких несущих осях (нить, проволока, шпагат и другие) с прокалыванием элементов модели или по заранее выполненным отверстиям в столбиках *1* (рис. 1, *б*). Затем их закручивают в двойную/тройную спираль, форму которой удерживает или фиксирует в собранной модели при транспортных и формовочных операциях модель литниковой системы, жестко прикрепленная к этой двойной спирали. Для удобства сборки на гибкой оси также применяют вариант, когда элементы имеют боковые прорези. В эти прорези вставлена лента из синтетической пленки, нить или проволока в качестве гибкой несущей или направляющей оси. Если столбики *1* (рис. 1, *б*) нанизывают на гибкий каркас, например, в виде спиральной или зигзагоподобной пружины, либо на объемный жесткий, предварительно изогнутый в виде двойной спирали, каркас, то отверстие в указанных деталях выполняют соответствующего размера. В последнем случае каркас служит внутренней арматурой, удерживающей форму модели в собранном виде, или холодильником для отливки, либо может быть изготовлен из металла, используемого для литья или легирования металла этой отливки.

Если для отливок по каким-либо причинам надо изменить созданный эволюцией «стандартный» прообраз конструкции ДНК, то перекладины выполняют не только как указано на рис. 1, *б*, но и в виде многолучевых распорок, многоугольных пластин или перегородок по периметру многоугольника. Перегородки спиралей располагают произвольно: под углом к оси спирали и с отношением *l/d*. Число спиральных остовов может соответствовать количеству лучей распорок или углов многоугольников при разном количестве перекладин на полный виток.

Элементы модели выполняют из различных материалов для удаляемых одноразовых литейных моделей, а модельные конструкции могут состоять из элементов с размерами от нескольких до сотен миллиметров. Простая конструкция элементов дает возможность получения их на пластавтоматах, что упростит конструирование каркасных ячеистых материалов и деталей, которые называют материалами будущего.

Заложенная в конструкции модели возможность закручивания или сборки в спираль упрощает литье новых облегченных, механически и эстетически совершенных спиралевидных конструкций. Одноразовые литейные модели, по конструкции подобные единой для всех клеточных организмов базовой матрице-прототипу, взятой из биофизики наномира в виде конструкции ДНК, расширяют возможности литья и номенклатуру литых каркасно-ячеистых конструкций для использования в технических и декоративных целях.

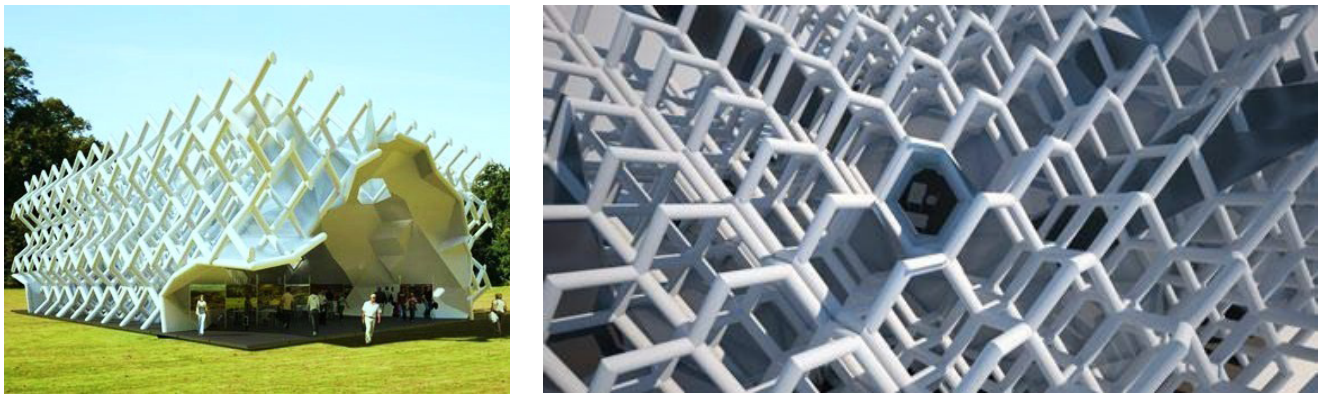
В статье [1] описана одноразовая модель, имитирующая структуру пены как ячеистой конструкции и состоящая из ребер, которые стыкуются под углом 109,47° [5]. Также известны другие пространственные структуры с расположением стыкующихся ребер под указанным углом, отличающиеся особыми свойствами. К ним можно отнести кристаллическую решетку алмаза – самого твердого природного материала, атомы углерода в структуре которого связаны прочной ковалентной связью с четырьмя соседними атомами, расположенными в вершинах тетраэдра [6], что является одной из основных причин его уникальных свойств. Все углы между связями атомов равны тетраэдрическому углу 109,47°, что соответствует наименьшей энергии отталкивания электронов, и эта протяженная пространственная структура отличается таким внутренним единством, что весь кристалл представляет как бы одну молекулу.

Энергетически выгодную конструкцию атомной решетки алмаза, обладающую высокой прочностью практически во всех направлениях, используют в строительстве, например, в конструкции мобильного павильона «Yorkshire Diamond» размерами 20×26×10 м, (фотография показана на рис. 2, *а)*. Он имеет несущий каркас из надувных сообщающихся труб, склеенных из синтетического полотна (фрагмент показан на рис. 2, *б*), в которые постоянно нагнетается воздух с помощью вентилятора [7].

Литейщик, занимающийся ЛГМ, увидев на рис. 2 пенопластовую модель, может захотеть такую же. Однако изготавливать одноразовые литейные модели из полимерных материалов в виде таких надувных трубчатых пространственных конструкций будет слишком дорого из-за высокой трудоемкости герметичного склеивания этих труб в систему с единой полостью, а также весьма затруднительно поддерживать газовое давление в трубах при засыпке их формовочным песком с последующим уплотнением. Поэтому для изготовления ячеистых моделей, как на рис. 2, *б*, решили задействовать такие новые материалы, как воздушно-пузырчатую синтетическую пленку (ВПСП). В отличие от пенопласта, который не гнется, изготовленные из нее плоские решетки можно изгибать под требуемым углом. Эта пленка служит прекрасным наполнителем, создавая объем модели. Из нее нетрудно изготовить плоские решетки с шестигранными отверстиями путем выполнения надрезов (по выкройке или картонному шаблону) и скручивания пленки в рулоны для выполнения перегородок таких решеток с шестигранными ячейками, как в решетке алмаза. Затем путем изгибания этих решеток в месте стыка перегородок их сшивали в пространственную стопочную конструкцию литейной модели перемычками из пенопласта. Применяли ВПСП российского производства по ТУ2245-006-18425183-2001 из пищевого полиэтилена и производства Украины – по ТУ У 25.2-30920106-001-2003 из пленки толщиной по основе от 45 до 300 мкм в зависимости от требуемой прочности. Большая номенклатура пленок включает двух- и трехслойные ВПСП из полиэтилена высокого давления для применения в диапазоне от –60 до +80 °С. ВПСП с диаметром пузырька 10 мм имеет общую толщину 4 мм, диаметром пузырька 30 мм – 10 мм. Также в продаже имеется пленка с размерами пузырька (диаметр × высоту, мм) 6×3,2; 10×(3,2-4,8); 25×(8-10). Номенклатура отечественных производителей как ВПСП, так и установок для ее производства с каждым годом растет, цена по отношению к другим полимерам имеет тенденцию к снижению.

Плотность в рулоне пленки с пузырьками 30 мм составляет около 7,5 кг/м^3, а масса 1 м^2 пленки с пузырьком диаметром 10 мм составляет: двухслойной 63-75 г, трехслойной 90-150 г. Сегодня на отечественном рынке цены 1 кг наиболее дешевых и массово применяемых для литейных моделей ВПСП и пенопласта сравнимы. Однако плотность рулонных изделий из ВПСП обычно в 3 раза меньше с учетом того, что для литья по газифицируемым моделям традиционно применяют пенопласт плотностью не ниже 22-25 кг/м^3, иначе модель может деформироваться при формовке. Регулировать толщины рулонных перегородок из ВПСП можно проколами нескольких пузырей.

Для увеличения жесткости рулонных перегородок крупногабаритных решеток и повышения их прочности на изгиб применили другие, нетрадиционные для моделей, углеводородные материалы – тонкостенные полипропиленовые трубки, располагая их в виде каркаса внутри и/или снаружи рулонной перегородки. Внутреннее расположение трубок облегчило скручивание рулонов ВПСП, повысило их



а *б*

Рис. 2. Павильон с несущим надувным каркасом в виде решетки, подобной структуре алмаза

толщину и прочность на изгиб. Применяли трубки диаметром 3-8 мм, толщиной 0,1 мм, которые массово выпускаются и используются в качестве соломин для питья напитков. Также для каркаса пригодны трубки с продольным разрезом и других диаметров, которые достаточно просто надеть поверх рулонных перегородок. Упругости трубок достаточно, чтобы полностью сомкнуться по линии разреза, образуя гладкую цилиндрическую поверхность.

Полипропилен – продукт полимеризации пропилена C_3H_6, термопластичный углеводородный полимер. В промышленности в последнее время он теснит такие углеводороды, как полистирол и другие пластики, обладая более высокой механической прочностью и упругостью, меньшей токсичностью. Сочетание в конструкциях литейных моделей полезных свойств указанных широко производимых легковесных материалов упрощало их изготовление.

На рис. 3, *а* приведена схема монтажа стопочной каркасной модели на примере двух плоских решеток, условно показанных в виде трех шестиугольных ячеек. Оси нижней решетки *1* выделены точкопунктирной линией, верхней *2* – штрихпунктирной. Эти две решетки при скреплении в углах шестиугольных ячеек параллельными вертикальными перемычками *3* деформируют все свои ячейки, в результате чего получается стопка изломанных (подобно зигзагу) при изгибании вверх-вниз на «алмазный» угол 109,47° решеток, условно обозначенная сплошными линиями *4* без учета их усадки.

На рис. 3, *б* показан зажим *1* при виде снизу, который силами трения удерживает перегородки *2* под углом 109,47° тем, что имеет для них направляющие канавки. У зажима из пенопласта небольшая, но достаточной прочности толщина стенок для выполнения модели. На рис. 3, *в* этот зажим представлен в разрезе. Он крепится на перемычке *1* и состоит из фигурной шайбы *2* и пробки *3*, у которых есть канавки, охватывающие три перегородки *4* в виде рулона ВПСП, свитого вокруг трубки *5*, которая обжимается вместе с рулоном.

Описанные варианты моделей позволят получать ячеистые отливки методом ЛГМ. Эти примеры являются лишь частными случаями ответа на поставленный в начале статьи вопрос о возможных конфигурациях пространственных отливок, получаемых в объеме сухого песка. Ячеистые литые изделия пока являются редкостью, однако такие конструкции отливок уже сегодня все чаще появляются на рынке затребованной металлопродукции.

Тому может послужить примером стальная отливка заготовки траверсы с габаритными размерами: шириной около 145 мм и высотой по центральному столбику 72 мм, 3D-модель которой показана на рис. 4, *а*. Эта заготовка спроектирована в опытном производстве одного из КБ заводов атомного энергомашиностроения. Конструкторы-разработчики назвали ее «снежинка». При экономии на оснастке для изготовления малых серий таких заготовок способом ЛГМ можно серийно изготавливать 1/6-ю пенопластовой модели (часть центрального столбика с веточкой). Затем собрать шесть одинаковых частей в целую модель, которую монтировать с подобными ей в модельные кусты и заливать металлом, получая сборные отливки.

Примером ячеистых декоративных отливок из медных сплавов может служить одно из изделий скульптора из Венеции Gianfranco Meggiato (см. рис. 4, *б*). Такие литые скульптуры из цикла Lost Foam (не менее десяти видов) в габаритных размерах обычно имеют 0,4-0,5 м, отдельные достигают 1 м. Десятки примеров полимерных моделей (одна из которых, «diamond», приведен на рис. 4, *в*), полученных методом быстрого прототипирования, показал в Интернете дизайнер George W. Hart [8]. Все они будто так и «просятся в песчаную форму» для превращения в металлические отливки.

Предложенными в статье литейными моделями автор пытался повторить природу в поиске границ возможных конфигураций пространственных металлоотливок. Литье как одно из древнейших ремесел (а отливки отечественных мастеров еще со времен Киевской Руси поражали своей искусностью) опережает в этом другие виды обработки металлов, шаг за шагом раскрывая свои возможности технологического воплощения науки. А замечательные, чаще всего ажурные ячеисто-каркасные, конструкции природы неизбежно будут перенесены технологами в новые металлоизделия с необходимыми преобразованиями, учитывающими поставленные технические задачи.

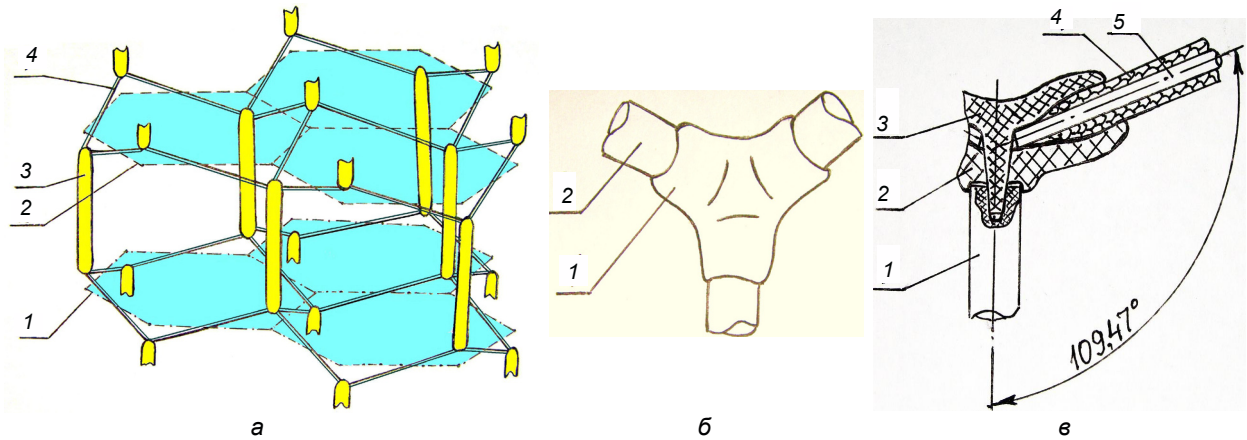
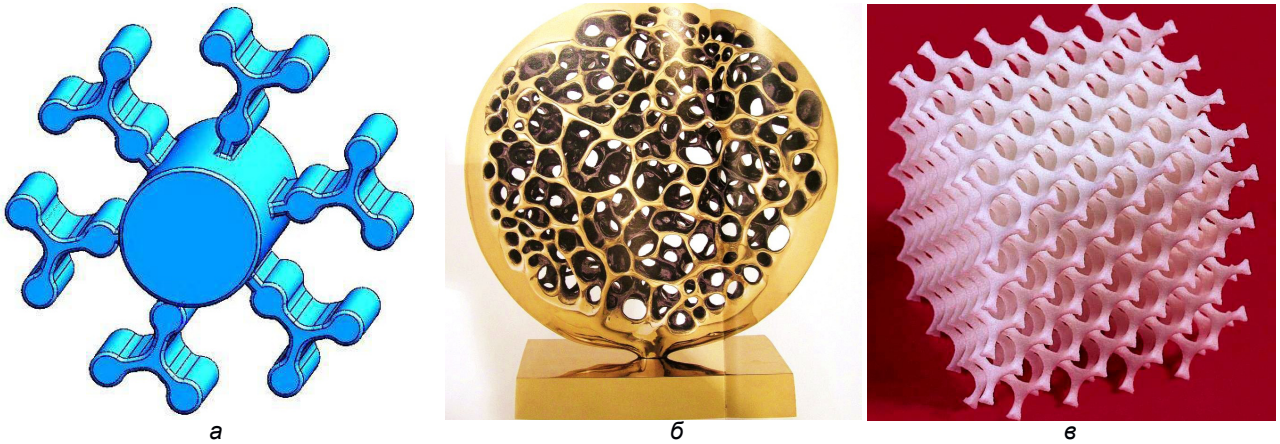


Рис. 3. Схема сборки модели (*а*) и узлы стыка: в плане (*б*) и разрезе (*в*)



а *б* *в*

Рис. 4. Примеры ячеистых отливок (*а, б*) и пенопластовой модели (*в*)

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дорошенко В. С.* Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям // Литейн. пр-во. – 2008. – № 9. – С. 28-32.
2. *Дорошенко В. С.* Пространственные литые конструкции, получаемые в объеме песка // Металл и литье Украины. – 2009. – № 7-8. – С. 45-52.
3. Пат. № 83447 Украины, МПК B22C7/00, B22C 9/00. Ливарна одноразова модель / О. Й. Шинский, В. С. Дорошенко. – Опубл. 2008, Бюл. № 13.
4. Архитектурная бионика /Ю. С. Лебедев, В. И. Рабинович, Е. Д. Положай и др. Под. ред. Ю. С. Лебедева. – М.: Стройиздат, 1990. – С. 89, 91.
5. Пат. № 87782 Украины, МПК B22C7/00. Ливарна одноразова модель / О. Й. Шинский, В. С. Дорошенко. – Опубл. 2009, Бюл. № 15.
6. Физический энциклопедический словарь / Под ред. А. М. Прохорова. – М.: Сов. энциклопедия, 1984. – С. 18.
7. Сайт журнала Design magazine: www.dezeen.com/2009/02/28/
8. Сайт дизайнера George W. Hart www.georgehart.com/rp/rp.html

Анотація

Дорошенко В. С.

Проблеми конструювання просторових каркасних виливків для лиття за моделями, що газифікуються

Запропоновано каркасні і комірчасті металеві конструкції виливати за газифікованими моделями. Описано ряд прикладів таких виливків, виконаних за аналогами з живої та неживої природи. Ці вироби відносять до матеріалів майбутнього, вони розширяють існуючий спектр властивостей металопродукції та мають потенціал застосування в конструкціях, які взаємодіють з об'ємом чи потоком речовини (енергії), а також як кістяк для армованих композиційних матеріалів та внутрішніх холодильників зливків і фасонних виливків.

Ключові слова *виливок; лиття за моделями, що газифікуються; матеріали майбутнього; коміркові*

Summary

Doroshenko V.

The problems of designing spatial frame castings for lost foam casting

It was proposed to cast frame and honeycomb metal structures by using the lost foam expendable patterns. Several examples of such castings made by analogues of animate and inanimate nature are described. These items relate to materials of the future, they will expand the existing range of properties of metal and have a potential use in structures that relate to the space or flow of substance (energy), also as the backbone for reinforced, composite materials and inner refrigerators for ingots and castings.

Keywords *casting, expendable pattern casting (lost foam), decomposable materials of the future, honeycomb*

Поступила 26.03.10