

# МАТЕРИАЛЫ И ОТЛИВКИ БУДУЩЕГО, или ДНК И СНЕЖИНКИ В МЕТАЛЛЕ

*Каркасные и ячеистые металлические конструкции предложено отливать по газифицируемым моделям. В статье 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 объёмом или потоком вещества или энергии, а также как костяк для армированных, композиционных материалов и внутренних холодильников для слитков и фасонных отливок.*

Технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ или Lost Foam Casting Process), используя размещение отливки или блока отливок в пространстве песка контейнерной песчаной формы, даёт основание поставить вопрос: «Какие пространственные конструкции литейщик может получать в объёме песка?». В противовес распространённой традиционной задаче как разместить отливку в плоскости литейной формы, когда литейщик следует за конструктором, сегодня он с помощью технологии ЛГМ может изготовить литые изделия, копируя природу в том, как она распространяет свои твёрдые конструкции в объёме газообразной или жидкой среды. Эта статья продолжает освещать проблематику разработки литых каркасно-ячеистых изделий и поиска путей оптимизации их конфигураций путём заимствования технических решений у природы, поскольку природой уже решены вопросы покорения пространства конструкциями с чрезвычайно высоким уровнем ресурсосбережения.

Переход к проектированию литых металлоизделий в объёме песка формы значительно расширяют спектр их конфигураций, и, в частности, открывают новое направление литья сотовых, объёмно-ячеистых, скелетно-решётчатых 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 имеют потенциал для применения как облегчённые несущие, армирующие, изолирующие, ограждающие, демпфирующие удары конструкции, способные находиться в среде, пропуская (полностью или частично) через себя поток вещества или энергии, применимы 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] по итогам разработок украинской научной школы в области литейного производства под руководством профессора О. И. Шинского предложено в конструкциях отливок использовать принципы строения: 1) кристаллических решёток как их изображают в кристаллографии; 2) спиралевидного расположения листьев – филлотаксис из ботаники; 3) пены со сквозными порами и ячейками из физико-химии, а также закономерности 4) конструкций деревьев, включая «деревья» бронхов и кровеносных сосудов млекопитающих, 5) микроструктуры аморфных металлов и 6) структуру углеродных нанотрубок.

Аналогичные 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, в природе не существующие. Классическим примером метода биомим-

етики служит Эйфелева башня, при конструировании которой автор использовал описание костной структуры головки бедренной кости, выполненное швейцарским профессором анатомии Х. фон Мейером.

Создавая конструкции одноразовых моделей для получения пространственных отливок, среди отобранных эволюцией конструкций живой природы нередко заметно 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 стилиобразующих 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 есть автомобильный музей Mercedes-Benz (построенный в Штутгарте, Германия, проект UN Studio van Berkel & Bos). В нём 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, т.к. он подобен пространственной пружине и отвечает на деформирующие нагрузки обратимым восстановлением формы. Закономерности формообразования ДНК как конструктивного стилиобразующего элемента на микроуровне, отобранного эволюцией и несущего разнообразие форм и функций органических существ, целесообразно копировать в металле 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 учтён в нижеописанной конструкции модели.

На рис. 1а 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 относительно предыдущей на  $36^\circ$  и отстоит от неё на расстоянии  $0,1l$ . Форму спирали удерживает или фиксирует модель литниковой системы 3, прикреплённая с помощью пайки или клея к остовам этой двойной спирали.

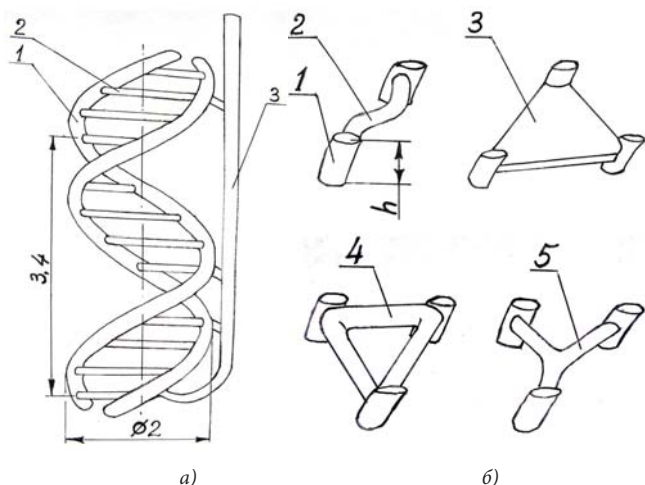


Рис. 1. Пенополистироловая модель (а) и варианты выполнения перегородок (б).

На рис. 1б 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  $\alpha = 360^\circ h/l$ . Перегородки 2 могут быть s-образной формы, как наиболее благоприятной для релаксации усадочных напряжений ячеистых отливок, а также в виде трёх- или многоугольных пластин 3, или перегородок 4 по периметру многоугольника. Показан также элемент из трёхлучевых распорок 5, последние три элемента предназначены для трёхспиральной модели.

Повторяющиеся детали для конкретной модели могут быть одного вида или между деталями 1 могут прокладываться столбчатые прокладки, чередуемые с элементами с перегородками. Элементы могут быть собраны клеей, пайкой встык, при этом могут применяться шаблоны, частично охватывающие снаружи стык столбиков 1 (рис. 1б), элементы могут иметь соединение «штырь-паз» или др.

Составляющие элементы могут набираться нанизыванием на гибких несущих осях (нить, проволока, шпагат и др.) с прокалыванием элементов модели или по заранее выполненным отверстиям в столбиках 1 (рис. 1б). Затем их закручивают в двойную/тройную спираль, форму которой удерживает или фиксирует в собранной модели при транспортных и формовочных операциях модель литниковой системы, жёстко прикреплённая к этой двойной спирали. Для удобства сборки на гибкой оси также применяют вариант, когда элементы имеют боковые прорезы, и в эти прорезы вставлена лента из синтетической плёнки, нить или проволока в качестве гибкой несущей или направляющей оси. Если столбики 1 (рис. 1б) нанизывают на гибкий каркас, например, в виде спиральной или зигзагоподобной пружины, либо на объёмный жёсткий 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 сборе, или холодильником для отливки, либо может быть изготовлен из металла, используемого для литья или легирования металла этой отливки.

Если по каким-либо причинам надо изменить для отливок созданный эволюцией «стандартный» прообраз конструкции ДНК, то имеется возможность выполнять перегородки не только как указано на рис. 1б, но и в виде многолучевых распорок, многоугольных пластин или перегородок по периметру

многоугольника. Перегородки спиралей можно располагать под произвольным углом к оси спирали и с произвольным отношением  $l/d$ . Число спиральных остовов может соответствовать количеству лучей распорок или углов многоугольников при произвольном количестве переключений на полный виток.

Элементы модели могут быть выполнены 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 даёт возможность получения их на пластавтоматах, что упростит конструирование каркасных ячеистых материалов и деталей, которые обычно называют материалами будущего.

Заложенная в конструкции модели возможность закручивания в спираль или сборки в спираль упрощает литье новых облегчённых, 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 рёбер, которые стыкуются под углом в  $109,47^\circ$  [5]. Также известны другие отличающиеся особыми свойствами пространственные структуры с расположением стыкующихся рёбер под указанным углом, в какой-то мере к ним можно отнести кристаллическую решётку алмаза – самого твёрдого 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  $109,47^\circ$ , что соответствует наименьшей энергии отталкивания электронов, и эта протяжённая пространственная структура отличается таким внутренним единством, что весь кристалл представляет как бы одну молекулу.

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



Рис. 2а. Павильон Yorkshire Diamond.

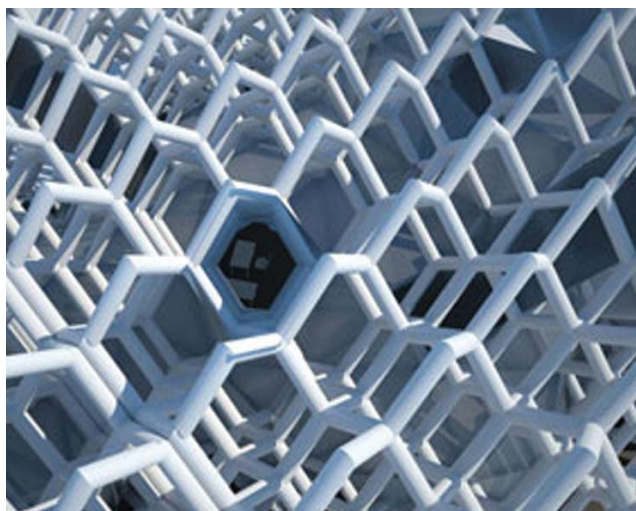


Рис. 2б. Фрагмент павильона с несущим надувным каркасом в виде решётки, подобной структуре алмаза.

При взгляде на рис. 2 литейщик, занимающийся ЛГМ, сразу подумает: «вот бы мне такую пенопластовую модель...». Однако изготавливать одноразовые литейные модели из полимерных материалов в виде таких надувных трубчатых пространственных конструкций будет слишком дорого из-за высокой трудоёмкости 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. 2б, решили задействовать такие новые материалы, как воздушно-пузырчатую синтетическую плёнку (ВПСП). В отличие от пенопласта, который не гнётся, изготовленные из неё плоские решётки можно изгибать под требуемым углом.

Эта плёнка служит прекрасным наполнителем, создавая объём модели. Из неё нетрудно изготовить плоские решётки с шестигранными отверстиями путём выполнения надрезов по выкройке или картонному шаблону и скручивания плёнки в рулоны для выполнения перегородок таких решёток с шестигранными ячейками, как в решётке алмаза. Затем, путём изгибания этих решёток, в месте стыка перегородок сшивали их 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 плёнки толщиной по основе от 45 до 300 мкм в зависимости от требуемой прочности. Большая номенклатура плёнок включает двух- и трёхслойные ВПСП из полиэтилена высокого давления для применения в диапазоне от 60...+80°C. ВПСП с диаметром пузырька 10 мм имеет общую толщину 4 мм, с диаметром пузырька 30 мм – 10 мм. Также в продаже имеется плёнка с размерами пузырька (диаметр х высота, мм) 6 х 3,2; 10 х 3,2...4,8; 25 х 8...10. Номенклатура отечественных производителей, как ВПСП, так и установок для её производства, с каждым годом растёт, цена по отношению к другим полимерам имеет тенденцию к снижению.

Плотность в рулоне плёнки с пузырьками 30 мм составляет около 7,5 кг/м<sup>3</sup>, а вес 1 м<sup>2</sup> плёнки с пузырьком диаметром 10 мм составляет: двухслойной – 63...75 г, трёхслойной – 90...150 г. Цены 1 кг ВПСП и наиболее дешёвого и массово применяемого для литейных моделей пенопласта сегод-

ня на отечественном рынке сравнимы, однако плотность рулонных изделий из ВПСП обычно в три раза меньше с учётом того, что для литья по газифицируемым моделям традиционно применяют пенопласт с плотностью не ниже 22...25 кг/м<sup>3</sup>, иначе модель может деформироваться при формовке. Регулировать толщины рулонных перегородок из ВПСП можно проколами нескольких пузырей.

Для крупногабаритных решёток, для увеличения жёсткости рулонных перегородок 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 толщину и прочность на изгиб. Применяли трубки диаметром 3...8, толщиной 0,1 мм, которые массово выпускаются и применяются в качестве соломок для питья напитков. Также пригодны для каркаса трубки и других диаметров, которые с продольным разрезом достаточно просто надеть поверх рулонных перегородок. Упругости трубок достаточно, чтобы полностью сомкнуться по линии разреза, образуя гладкую цилиндрическую поверхность. Полипропилен – продукт полимеризации пропилена C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>. Термопластичный углеводородный полимер в последнее время в промышленности 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.

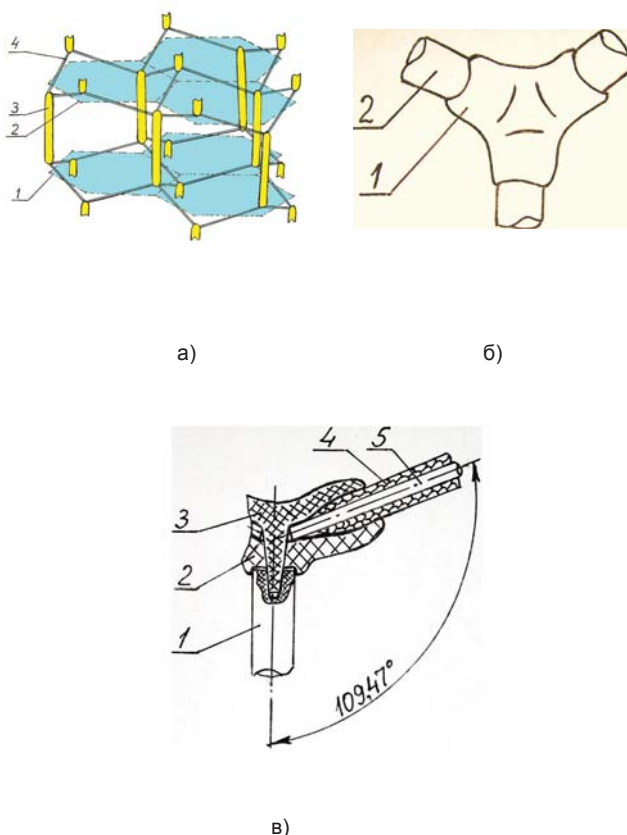


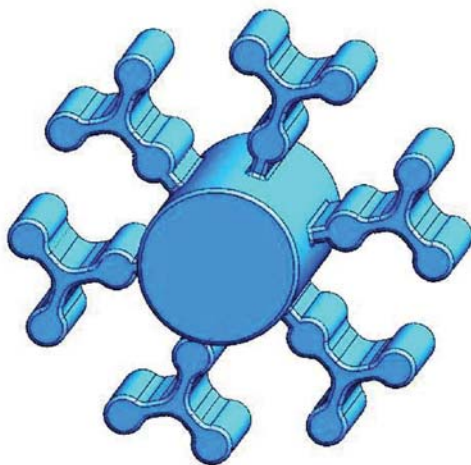
Рис. 3. Схема сборки модели – а) и узлы стыка в плане – б) и в разрезе – в).

На рис. 3а приведена схема монтажа стопочной каркасной модели на примере двух плоских решёток, условно показанных в виде трёх шестиугольных ячеек. Оси нижней решётки 1 показаны точко-пунктирной линией, верхней 2 – штрих-пунктирной. Эти две решётки 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  $109,47^\circ$  решёток, условно показанная сплошными линиями 4 без учёта их усадки.

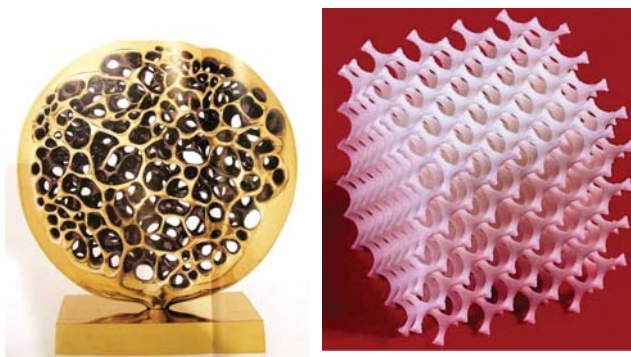
На рис. 3б показан зажим 1 при виде снизу, который силами трения удерживает перегородки 2 под углом  $109,47^\circ$  тем, что имеет для них направляющие канавки. Зажим из пенопласта имеет небольшую, но достаточной прочности толщину стенок для выполнения модели. На рис. 3в показан этот зажим в разрезе. Он крепится на перемычке 1 и состоит из фигурной шайбы 2 и пробки 3, которые имеют канавки и охватывают три перегородки 4 в виде рулона ВПСР, 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 объёме сухого песка. Ячеистые литые изделия пока являются редкостью, однако такие конструкции отливок уже сегодня всё 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, 3-D модель которой показана на рис. 4а. Эта заготовка спроектирована в опытном производстве одного из КБ заводов атомного энергомашиностроения, конструкторы-разработчики назвали её «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). А затем собирать шесть одинаковых частей в целую модель, которую монтировать с ней подобными в модельные кусты и заливать металлом, получая отливки, похожие на гроздь винограда.



а)



б)

в)

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

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

Предложенными в статье литейными моделями мы пытаемся копировать природу в нашем поиске границ возможных конфигураций пространственных металлоотливок. Литые как одно из древнейших ремёсел (а отливки отечественных мастеров ещё со времён Киевской Руси поражали своей искусностью) в этом опережает 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 под решение наших технических задач.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дорошенко В. С. Копируя структуры Вселенной: технологии будущего работают уже сегодня//Станочный парк. Санкт-Петербург. 2009. № 3. С. 24 - 28.
2. Дорошенко В. С. Фантастика литья пространственных каркасно-ячеистых металлоконструкций//Станочный парк. Санкт-Петербург. 2009. № 9. С. 37 - 41.
3. Патент UA 83447 МПК В22С7/00, В22С 9/00. Опубл. 2008, бюл. № 13. Ливарна одноразова модель/О.Й. Шинский, В.С. Дорошенко.
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. Патент UA 87782 МПК В22С 7/00, опубл. 2009, бюл. № 15. Ливарна одноразова модель/О.Й. Шинский, В.С. Дорошенко.
6. Физический энциклопедический словарь/Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Сов. Энциклопедия, 1984, с. 18.
7. Сайт журнала Design magazine: [www.dezeen.com/2009/02/28/](http://www.dezeen.com/2009/02/28/)
8. Сайт дизайнера George W. Hart <http://www.georgehart.com/rp/rp.html>

В. С. Дорошенко, к.т.н., ФТИМС НАН Украины, г. Киев.