

В. А. Лысенко

Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна

Промышленный дизайн пористых токопроводящих подложек для топливных элементов

Рассмотрены закономерности промышленного дизайна пористых токопроводящих подложек топливных элементов на примере компании Ballard и технологические особенности их изготовления. Показано, что дизайн можно моделировать как систему взаимодействующих компонентов, имеющую цель и закономерности функционирования и развития.

Пористые токопроводящие (газодиффузионные) подложки являются важным компонентом топливных элементов (ТЭ). Создание и выпуск газодиффузионных подложек (ГДП) в промышленном масштабе представляют сложную задачу, решение которой оптимально с применением методов дизайна [1]. При этом анализ ГДП как объекта дизайна (ОД) и анализ процесса дизайна целесообразно проводить с позиций теории систем [2].

ГДП является сложной системой, описание и анализ которой в зависимости от поставленных целей можно проводить на следующих уровнях.

Уровень конструкции. ОД рассматривается как конструкция, состоящая из элементов, определенным образом расположенных в пространстве, и связей, организующих эти элементы в единое целое как систему.

Уровень технологий характеризуется множеством технологий, применение которых по определенному алгоритму позволяет создать ОД и обеспечить его существование (функционирование как системы) в полном жизненном цикле.

Уровень функционирования (существования) определяется

множеством функций, которые выполняет ОД — ГДП как самостоятельная система, взаимодействующая с физическими средами в ТЭ; как интегральная составная часть ТЭ или как самостоятельный потребительский продукт, или в составе ТЭ, на соответствующих рынках.

При промышленном производстве ГДП особое значение приобретают такие параметры ОД, как базовая функциональность, потенциал функциональности, время и другие ресурсы, затраченные на создание ОД, себестоимость и рыночная стоимость ОД как потребительского продукта.

Рассмотрим некоторые закономерности и особенности дизайна ГДП на примере газопроницаемых токопроводящих подложек компании Ballard [3].

Компания Ballard выпускает ГДП, имеющие две базовые конструкции — со структурой ткани (БКТ) и структурой бумаги (БКБ) [4]. Подобные конструкции подробно описаны в литературе [5]. Кроме того, базовая конструкция может быть дополнена нанесением гидрофобизирующего покрытия (ГФ) и микропористого слоя (МПС).

Физико-технические и электрофизические характеристики конструкций типа БКТ, БКБ, БКТ/БКБ+ГФ, БКТ/БКБ+ГФ+МПС приведены на сайте компании Ballard [4].

На функциональном уровне свойства ГДП можно оценить, например, по поляризационным кривым, на основании многочисленных исследований по затоплению ГДП, по холодному запуску ТЭ с ГДП [6, 7], по характеристикам

продуктов марки Mark™, выпускаемых Ballard [4] и т. д.

В данной работе проанализируем дизайн ГДП Ballard на уровне технологий, а также с позиций системного моделирования дизайна.

Кратко укажем на некоторые ключевые технологии, применяемые в производстве ГДП:

1) технология Avox™ получения окисленного полиакрилонитрильного (ПАН) волокна, разработанная самой компанией Ballard;

2) технологии переработки окисленного ПАН-волокна в штапельные волокна и потом в ткани требуемого переплетения;

3) технология AccuCarb™ (разработана самой компанией Ballard) непрерывной карбонизации изделий из окисленных ПАН-волокон, в результате которой получают изделия из карбонизованных углеродных волокон с содержанием углерода в ткани 88–95%. Ткань обозначается «НС»;

4) разработанная самой компанией Ballard технология вакуумной термообработки при температурах около 2800 °С (графитация), в результате которой содержание углерода в углеродном волокне увеличивается до 99+%. Полученные таким образом ткани обозначаются «НСВ»;

5) технологии переработки углеродных нитей в резаные волокна;

6) бумагоделательные технологии получения настила из углеродных волокон;

7) технологии пропитки настила полимерным связующим с последующей термообработкой.

В результате применения вышеупомянутых технологий получают базовые ГДП на основе углеродных тканей или бумаг;

8) технологии гидрофобизации базовых ГДП на основе тканей или бумаг, технологии приготовления состава МПС и его нанесения;

9) технологии измерения параметров ГДП и тестирования ГДП в составе ТЭ и устройств на их основе;

10) технологии маркетинга и продаж ГДП и устройств на их основе;

11) технологии информационного обеспечения финансовых, материальных, интеллектуальных и других потоков дизайна ГДП и устройств с ТЭ.

Таков далеко не полный перечень высоких технологий, вовлеченных в процесс дизайна ГДП, которыми обладает *Ballard*.

На *рис. 1* представлена упрощенная схема дизайна ГДП компании *Ballard*.

С позиции теории систем, дизайн представляет собой систему взаимодействующих структурных компонентов (элементов и связей): потребностей отраслей экономики и потребительских рынков; исходных технологических процессов; разработанных материалов, специально созданных технологий, конечных рыночных продуктов; информационных, финансовых, технологических, интеллектуальных потоков и т. д.

В основе дизайна ГДП *Ballard* лежала *потребность* оборонных областей экономики в углеродных материалах, прежде всего в карбонизованных и графитированных тканях (ткани AvCarb® марки НС и НСВ соответственно [1]). Реализация этой *потребности* привела к разработке *технологии* карбонизации AccuCarb™ и графитации для изготовления углеродных тканей.

Второй *потребностью* являлась *потребность* в создании литий-ионных источников тока. При этом была решена задача разработки эффективных пористых графито-

вых электродов для таких источников тока. Накопленный опыт позже был с успехом использован в работе компании *Ballard*.

В дальнейшем усилившаяся потребность общества (и оборонных отраслей) в экологически чистых, бесшумных источниках энергии привела к созданию в 1979 г. компании *Ballard Power Systems Inc.* (сокращенно — *Ballard*). Компания стала активно осваивать рынок водородной энергетики и топливных элементов с полимерными протонообменными мембранами. Заметим, что потребность в создании ГДП была *внутренней потребностью* самой компании *Ballard*, так как с самого начала она ставила целью создание не только ГДП, но формирование рынка конкурентоспособных систем на основе топливных элементов. Решение такой сверхзадачи в конечном итоге и определило успех *Ballard* на рынках устройств водородной энергетики в целом и ГДП в частности.

В настоящее время компанией *Ballard* создана серия высокотехнологичных продуктов, перекрывающих широкий спектр потребительских рынков (*таблица 4*).

Дизайн ГДП *Ballard* развивался *по наиболее простому пути*. Обладая технологией изготовления углеродных тканей для авиаракетостроения, специалисты *Ballard* используют свой опыт и разрабатывают углеродную ткань для применения *по новому назначению* — в качестве ГДП топливных элементов (ткань AvCarb® 1071НСВ, *рис. 1*).

Потребность в массовом производстве ТЭ и ГДП определила *цель* — необходимость в снижении стоимости ГДП, в результате была применена бумагоделательная технология. Новое сырье (углеродные волокна) было использовано для изготовления нового изделия — углеволокнистой бумаги со специальными свойствами ГДП: AvCarb® P50 и P75.

Потребность в расширении функциональности ГДП за счет устранения затопления ГДП и ТЭ

привела к разработке технологии гидрофобизации ГДП. Одновременно она же дала толчок к использованию гидрофобизирующей пропитки по двойному назначению: как связующего волокон и как гидрофобизирующей пропитки. Это позволило из известной к тому времени технологии получения ГДП в виде углерод-углеродных композитов со структурой бумаги [5] устранить операции карбонизации и графитации. Углерод-углеродный композит ГДП заменен на углерод-полимерный композит — налажен промышленный выпуск углеволокнистых бумаг AvCarb® P50T и P75T.

Такой дизайнерский подход позволил еще больше *снизить себестоимость* ГДП и увеличить ее *функциональность* в целом.

Заметим, что *функциональность* ГДП была увеличена не только за счет введения в ГДП гидрофобизирующей пропитки, но и за счет разработки и применения технологии нанесения микропористого слоя.

В результате удалось обеспечить как устранение заводнения ГДП, так и управление водой. Следствием разработки и применения технологий гидрофобизации и нанесения микропористого слоя явилось создание нового типа продуктов, названных специалистами *Ballard* газодиффузионными системами (обозначается как «GDS»). К настоящему времени конструкция ГДП типа БКТ/БКБ + ГФ + МПС фактически стала промышленным стандартом выпуска ГДП, которого придерживаются все крупнейшие мировые производители ГДП.

Реакцией на потребность рынка в ГДП, работающих при высоких плотностях тока и позволяющих проводить автоматизированную сборку ТЭ, явилась разработка ГДП типа EP40, EP40T, GDS3215.

Откликом на потребность рынка метанольных ТЭ стала разработка новой ГДП типа GDS22100 в сочетании с P75T.

Потребительские рынки и продукты компании *Ballard*

Продукт	Рынок						
	Когенерация (ТЭЦ)	Резервные электростанции	Подъемно-транспортное оборудование (автопогрузчики и пр.)	Гибридные автобусы	Автомобили на ТЭ	Углеродные волокна	Развивающиеся рынки
Mark1030™	+						+
Mark1020 ACS™		+	+				
Mark9 SSL™			+				
HD6™				+			
Mark902™ и Mark1100™					+		+
ГДП и углеродные фрикционные материалы						+	

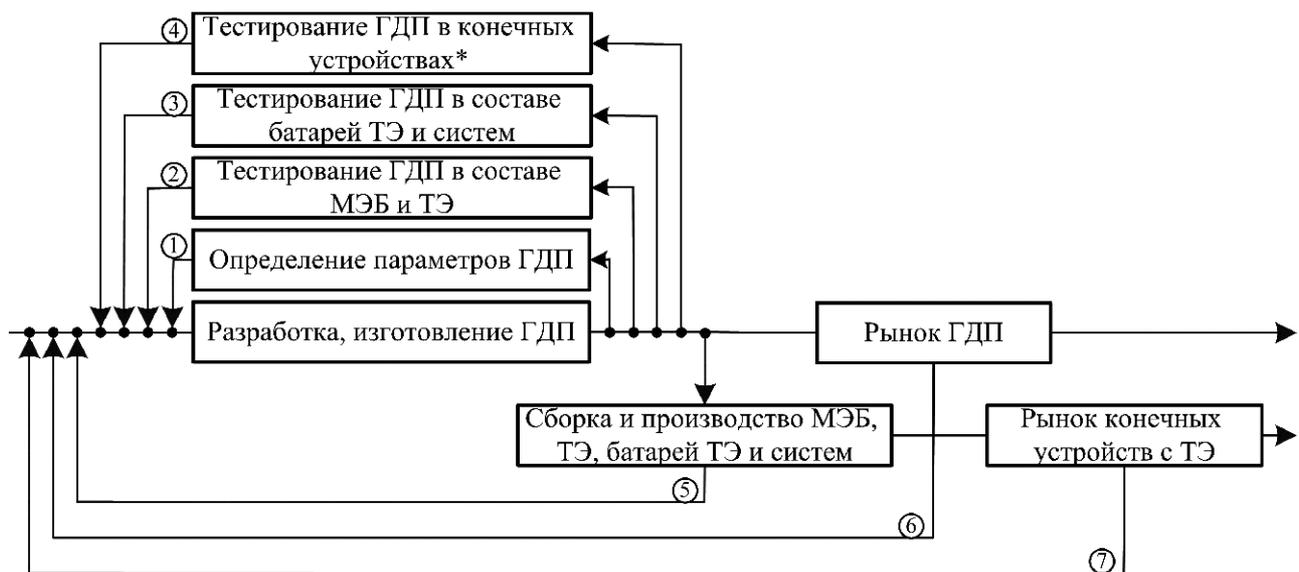


Рис. 2. Фрагмент упрощенной схемы дизайна ГДП

Отличительной чертой дизайна ГДП фирмы *Ballard* по сравнению с продукцией многих других производителей ГДП (*SGL Group, Toray, Spectracorp* и др.) является то, что в структуре самой фирмы имеются подразделения, занимающиеся не только измерением параметров ГДП, но и тестирова-

нием поведения ГДП на различных этапах дизайна и редизайна.

На рис. 2 представлена упрощенная схема фрагмента дизайна ГДП.

Мы видим, что дизайн ГДП проходит сложные циклы, характеризующиеся многочисленными контурами обратной связи ①–⑦.

Наличие в структуре *Ballard* не только подразделений по выпуску высококачественного углеродного волокна и ГДП на его основе, но и Центра исследований и разработок систем с ТЭ в г. Барнаби (Vignaby, Канада), а также подразделения по выпуску таких систем, подразделений по марке-

тингу и продажам существенно сокращает технологический цикл создания (дизайна) как ГДП, так и конечных устройств с ГДП в составе мембранно-электродных блоков (МЭБ), ТЭ, батарей ТЭ и систем ТЭ.

При этом в процесс дизайна наибольшие коррекции вносит рынок и его потребности: в данном случае рынок законченных устройств с ГДП. При непосредственном использовании разработок *Ballard* в 1993 г. впервые в мире (г. Ванкувер, Канада) был создан автобус, работающий на водороде, использующий ТЭ с протонообменными мембранами и имеющий нулевой уровень загрязнений окружающей среды. Несмотря на существенные достижения в создании ТЭ для автомобилестроения, в ноябре 2007 г. компания *Ballard* продала свое подразделение по разработке и производству автомобильных водородных топливных элементов компаниям *Ford* и *Daimler AG* [8] и сконцентрировалась на рынках ТЭ для грузоподъемного оборудования и стационарных электрогенераторов [3]. При этом компания *Ballard* предпочла сохранить у себя технологию и производство ГДП как одного из ключевых компонентов ТЭ.

Анализ модели дизайна (см., например, рис. 1, 2) показывает, что фундаментальными компонентами дизайна как системы, определяющими его развитие, являются потребности (общества, заказчика, производителя и пр.), цели и технологии.

Для компании *Ballard* ключевыми технологиями дизайна ГДП являются собственные технологии изготовления углеродных волокон и тканей (*Avox*TM, *AccuCarb*TM, *AvCarb*[®]), технологии гидрофобизации и нанесения микропористых слоев. При этом дизайн ГДП определяется множеством всех технологий — как собственных, так и привнесенных и доработанных; как непосред-

ственно касающихся изготовления ГДП, так и опосредованно, через определение их свойств в результате применения самых современных технологий сборки и тестирования МЭБ, ТЭ, систем ТЭ в составе конечных устройств; технологий эксплуатации конечных устройств, а также получения обратной информации в результате маркетинговых исследований реакции рынков. В общем случае можно однозначно говорить о том, что дизайн является функцией потребностей, целей и технологий.

Таким образом, в рамках рассматриваемой модели дизайн является системой взаимодействующих между собой структурных компонентов (элементов и связей). Устойчивое функционирование системы обеспечивает наличие подсистем с обратными связями. Дизайн как система характеризуется целью. Цель дизайна, с точки зрения стороннего наблюдателя, состоит в оптимальном удовлетворении потребностей участников дизайна.

Дизайн развивается по наиболее простому (технологическому, техническому, экономическому) для конкретных заказчиков, исполнителей, потребителей пути и характеризуется созданием продукта, прежде всего обладающего базовой функциональностью. Создание технически сложных объектов неизбежно происходит с вовлечением в процесс дизайна новых технологий и/или материалов, а также разработкой в ряде случаев принципиально новых процессов, материалов, устройств для создания объекта дизайна. При этом закономерно увеличение информационного содержания объекта дизайна.

Автор выражает благодарность заведующему кафедрой наноструктурных, волокнистых и композиционных материалов СПГУТД профессору А. А. Лысенко за плодотворные дискуссии по теме статьи, П. Ю. Сальниковой за помощь в оформлении статьи.

Примечание

Ballard Material Products Inc. является подразделением *Ballard Power Systems Inc.* (сокращенно — *Ballard*). *Ballard* и *Power to Change the World* являются зарегистрированными товарными марками *Ballard Power Systems Inc.* *AccuCarb*TM и *AvCarb*[®] являются товарными марками *Ballard Material Product Inc.* [4].

Литература

1. Ульрих, К. Промышленный дизайн: создание и производство продукта / К. Ульрих, С. Эппингер; пер. с англ. М. Лебедева; под общ. ред. А. Матвеева. — М.: Вершина, 2007. — 448 с.
2. Волкова, В. Н. Теория систем / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. — М.: Высшая школа, 2006. — 511 с.
3. Ballard Power Systems. — http://en.wikipedia.org/wiki/Ballard_Power_Systems
4. Ballard. — <http://www.ballard.com>
5. Hand book of Fuel Cells — Fundamentals, Technology and Applications / eds. by Wolf Vielstich, Hubert A. Gasteiger, Arnold Lamm. — John Wiley & Sons, Ltd., 2003. — Vol. 3: Fuel Cell Technology and Applications. Ch. 46: Diffusion media materials and characterization. Mark Mathias, Joerd Roth, Jerry Fleming, Werner Lehnert. — P. 1–21.
6. Borup, R. Water Transport Exploratory Studies / R. Borup [et al] // Fuel Cell Seminar. — 2007. — www.fuelcellseminar.com/2007_presentations.asp
7. U. S. Department of Energy. Hydrogen Program. 2007 Annual Progress Report. V. Fuel Cell. — http://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress07_fuelcells.html.
8. Ballard Power Systems. — http://ru.wikipedia.org/wiki/Ballard_Power_Systems

Ключевые слова:

газодиффузионная подложка, дизайн, топливный элемент, углеродные волокна и композиты.