



Бионический дизайн



CML
CompMechLab

ЦЕНТР
КОМПЬЮТЕРНОГО
ИНЖИНИРИНГА СПбГУ



CML
CompMechLab

ЦЕНТР
КОМПЬЮТЕРНОГО
ИНЖИНИРИНГА СПбПУ

Бионический дизайн

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2015

ББК 32.818

Б 63

Рецензенты:

Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор технических наук, профессор СПбПУ Ю.Я. Болдырев

Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, доктор технических наук, профессор СПбПУ П.И. Романов

Авторы:

А.И. Боровков, В.М. Марусева, Ю.А. Рябов, Л.А. Щербина

Бионический дизайн / А.И. Боровков [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 92 с.

Монография содержит аналитические материалы по актуальному тренду технологического развития на современном этапе – использованию бионических принципов в процессе проектирования продуктов нового поколения. Рассмотрены понятия «бионика», «биомиметика» и «биомимикрия». Впервые в литературе дается определение бионического дизайна (Simulation & Optimization)-Driven Bionic Design как принципиально нового подхода к проектированию и созданию «best-in-class» оптимизированных конструкций в результате конвергенции и синергии двух глобальных трендов – стремительного развития компьютерного инжиниринга, включая технологии оптимизации, и аддитивных технологий. Представлена информация о примерах использования бионических принципов в архитектуре, промышленном дизайне и различных отраслях промышленности – автомобилестроении, авиакосмической отрасли, робототехнике и оборонно-промышленном комплексе.

Группа подготовки издания:

Подготовка оригинал-макета: Д.С. Сачава

Дизайн: М.Р. Зарипов

Верстка: О.А. Костюшенко

Технический редактор: Ю.А. Рябов

На обложке – автомобильная деталь, спроектированная, оптимизированная и изготовленная в Инжиниринговом центре «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ с применением принципов бионического дизайна.

Оглавление

Предисловие	7
Введение. Определение бионического дизайна	15
Традиционный подход: бионика, биомиметика, биомимикрия	15
Современный подход: бионический дизайн	18
1 Бионический дизайн, топологическая оптимизация и аддитивные технологии.	25
1.1 Методы топологической оптимизации: значение бионических принципов.	25
1.2 Топологическая оптимизация в сочетании с традиционными и аддитивными методами производства.	28
2 Бионические принципы в архитектуре и промышленном дизайне.	42
3 Бионический дизайн в технике и медицине.	58
3.1 Автомобилестроение и машиностроение	58
<i>Bionic car Mercedes-Benz</i>	58
<i>Футуристические концепт-кары EDAG</i>	59
<i>Cadillac Aera</i>	62
<i>WaterBone Vehicle Design</i>	62
<i>ELiSE</i>	64
<i>Электropоезд серии 500 высокоскоростной сети железных дорог «Синкансэн»</i>	65
3.2 Робототехника	65
<i>Бионическая стрекоза Bionic Opter</i>	65
<i>Робот-саламандра Pleurobot</i>	66
<i>3D-принтеры-роботы для печати конструкций в воздухе</i>	67
3.3 Медицина и передовые материалы.	69
<i>Протезы</i>	69
<i>Бионическое сердце</i>	70
<i>Антимикробное покрытие Sharklet</i>	70
3.4 Оборонно-промышленный комплекс	71
<i>Бронежилеты</i>	71
<i>Бронетехника</i>	72
3.5 Авиакосмическая отрасль	73
<i>Космическая «фабрика-паук» (Spider Fab)</i>	73
<i>Футуристический проект компании Airbus</i>	74
Заключение	75
Список литературы	78
Об Инжиниринговом центре «Центр компьютерного инжиниринга» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.	91

Список рисунков, вставок и таблиц

Рисунок 1. Инжиниринговые центры, созданные в 2013–2014 гг. на базе ведущих университетов.	8
Рисунок 2. Межотраслевые и отраслевые региональные центры инжиниринга	8
Рисунок 3. Визит Министра промышленности и торговли РФ Д.В. Мантурова и Министра образования и науки РФ Д.В. Ливанова в Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого 23 января 2015 г.	9
Рисунок 4. Оценка промежуточных итогов деятельности инжиниринговых центров, созданных в 2013 г. при вузах	10
Рисунок 5. Матрица Национальной технологической инициативы	12
Рисунок 6. Матрица Национальной технологической инициативы в понимании Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ и рабочей группы «Цифровое проектирование и моделирование, новые материалы и аддитивные технологии»	13
Таблица 1. Алгоритмы заимствования из живой природы при создании инновационной продукции	17
Рисунок 7. Строение кости	19
Рисунок 8. Онтогенез трубчатой кости	20
Рисунок 9. Виды оптимизации: размеров (а), формы (b), топологическая (с)	21
Рисунок 10. Два варианта использования оптимизации в процессе проектирования промышленной продукции.	22
Рисунок 11. Множество Парето.	23
Рисунок 12. Пример полых структур в живой природе: пробка (а), бальза (b), губка (с), трабекулярная костная ткань (d), коралл (е), кость каракатицы (f), ткань листа ириса (g), стебель растения (h)	26
Рисунок 13. Механические свойства инженерных и природных материалов: отношение модуля Юнга к плотности (а) и отношение прочности к плотности (b)	27
Вставка 1. Программная система Tosca Structure.	28
Вставка 2. Программная система Tosca Fluid	29
Вставка 3. Программная система solidThinking Inspire	29
Рисунок 14. Пример топологической оптимизации опоры раздаточной коробки передач автомобиля.	30
Рисунок 15. Примеры форм решетчатых структур, используемых в промышленности: сотовые (а, b, с), призматические (d, e, f), ферменные (g, h, i).	31
Таблица 2. Сравнительный анализ процессов производства полых структур	33
Рисунок 16. Примеры оптимизации полых структур в программных системах Altair OptiStruct (верхний ряд) и Simpleware ScanIP+CAD (нижний ряд).	34
Рисунок 17. Образцы микрорешетчатых структур, разработанных инженерами Ливерморской национальной лаборатории им. Эрнеста Лоуренса и Массачусетского технологического института: полимерные шаблоны (а, е); никель-фосфорная микрорешетка, работающая на растяжение (b, f); оксидоалюминиевая микрорешетка, работающая на растяжение и изготовленная методом атомно-слоевого осаждения (с, g); оксидоалюминиевая микрорешетка, работающая на растяжение и изготовленная гибридным методом (d, h)	36

Рисунок 18. Механические свойства микрорешетчатых структур, разработанных инженерами Ливерморской национальной лаборатории им. Эрнеста Лоуренса и Массачусетского технологического института: относительная жесткость на сжатие (относительный модуль Юнга) к относительной плотности (a) и относительная прочность на сжатие к относительной плотности (b)	37
Рисунок 19. Механические свойства микрорешетчатых структур, разработанных инженерами Ливерморской национальной лаборатории им. Эрнеста Лоуренса и Массачусетского технологического института, в сравнении с металлами, композитами, керамическими материалами и другими сверхлегкими материалами, информация о которых нашла отражение в научной литературе, – графеновыми эластомерами, сверхлегкими металлическими микрорешетками и пеной из углеродных нанотрубок	38
Рисунок 20. Композитные микрорешетчатые структуры subcost, разработанные инженерами Массачусетского технологического института	39
Рисунок 21. Процесс лазерного аддитивного производства (LAM), используемый Гамбургским техническим университетом и Северным лазерным центром	40
Рисунок 22. Процесс проектирования и оптимизации бионических облегченных конструкций, разработанный в Гамбургском техническом университете и Северном лазерном центре	41
Рисунок 23. Схема имитации живой природы при постройке типи и тентов	42
Рисунок 24. Использование бионических принципов в архитектуре: слева – бедренная кость человека, справа – Эйфелева башня	43
Рисунок 25. Использование бионических принципов в архитектуре: слева – лист магнолии, справа – здание приходской школы при храме Святого Семейства.	43
Таблица 3. Систематизация уровней применения бионических принципов	44
Рисунок 26. «Карта биомиметики»	45
Рисунок 27. Использование бионических принципов в архитектуре: слева – панголин, справа – крыша международного железнодорожного терминала Ватерлоо	45
Рисунок 28. Использование бионических принципов в архитектуре: слева – птичье гнездо, справа – Национальный стадион Пекина	46
Рисунок 29. Использование бионических принципов в архитектуре: слева – мыльные пузыри, справа – Водный центр Пекина	46
Рисунок 30. Концепция Bionic Tower.	47
Рисунок 31. Оптимизация перфорированных стальных балок Bionic Tower: результат применения функции OSS в HyperMesh для использования в качестве базы (a), моделирование поверхности на основе полученных результатов (b), окончательная версия конструкции (c)	47
Рисунок 32. Проектирование Bionic Tower: заготовка и ствол здания (a), экзоскелет (b), подконструкция (c), строительная оболочка (d), результаты топологической оптимизации наружной конструкции здания (e), окончательный концепт проекта (f)	48
Рисунок 33. Концепты зданий, подражающие природе по нескольким параметрам: слева направо – концепт Treescraper Tower of Tomorrow, Habitat 2020, интерьер Habitat 2020.	49
Рисунок 34. Архитектурные конструкции Monolite UK Ltd, изготовленные посредством 3D-печати.	50
Рисунок 35. Промышленный дизайн концепции беговых кроссовок в solidThinking Evolve.	52
Рисунок 36. Промышленный дизайн велосипедной рамы, полученный при помощи solidThinking Inspire и 3D-печати.	53

Рисунок 37. Промышленный дизайн кроссовки компании New Balance	54
Рисунок 38. Примеры промышленного дизайна обуви	55
Рисунок 39. Конструктор Crossbeams компании Seven:Twelve Engineering.	55
Рисунок 40. Мини-болид Cirin.	56
Рисунок 41. 3D-печатное мягкое кресло «Биомимикрия»	56
Рисунок 42. Бионический автомобиль компании Mercedes-Benz (Bionic car)	59
Рисунок 43. Концепт-кар EDAG Genesis	60
Рисунок 44. Концепт-кар EDAG Light Cocoon	60
Рисунок 45. Конструкция шасси и кабины грузовика Power Entry Concepts.	61
Рисунок 46. Концепт-кар Cadillac Aera	62
Рисунок 47. Проект Aerodynamic Water Droplet with Strong Lightweight Bone Structure .	63
Рисунок 48. Оптимизация обода колеса автомобиля на основе водоросли Arachnoidicus .	64
Рисунок 49. Оптимизация опоры морской ветровой энергетической установки на основе скелета радиолярии	64
Рисунок 50. Использование бионических принципов в железнодорожном машиностроении: слева – зимородок, справа – поезд «Синкансэн» серии 500	65
Рисунок 51. Использование бионических принципов в робототехнике: слева – стрекоза, справа – дрон-стрекоза Bionic Opter	66
Рисунок 52. Использование бионических принципов в робототехнике: слева – саламандра, справа – робот Pleurobot	66
Рисунок 53. 3D-принтеры-роботы MX3D-Metal и MX3D-Resin	67
Рисунок 54. Печать «бионического» моста при помощи 3D-принтеров-роботов MX3D-Metal	68
Рисунок 55. Использование бионических принципов в медицине: слева – пластиковая модель лопатки, справа – титановый протез.	69
Рисунок 56. Бионическое сердце.	70
Рисунок 57. Использование бионических принципов при создании передовых материалов: слева – кожа галапагосской акулы, справа – пленка Sharklet	71
Рисунок 58. Использование бионических принципов в оборонно-промышленном комплексе: структура чешуи у разных животных и броня, разработанная командой бостонского Северо-Восточного университета	72
Рисунок 59. Пример заимствования принципов из живой природы при создании бронетехники: слева – кошачья лапа с выпущенными когтями, справа – конструкция гусеничного движителя танка Т-90	73
Рисунок 60. Использование бионических принципов в авиакосмической отрасли: сверху слева – паук, сверху справа и снизу – «фабрика-паук»	74
Рисунок 61. Футуристический концепт самолета Airbus.	74

Предисловие

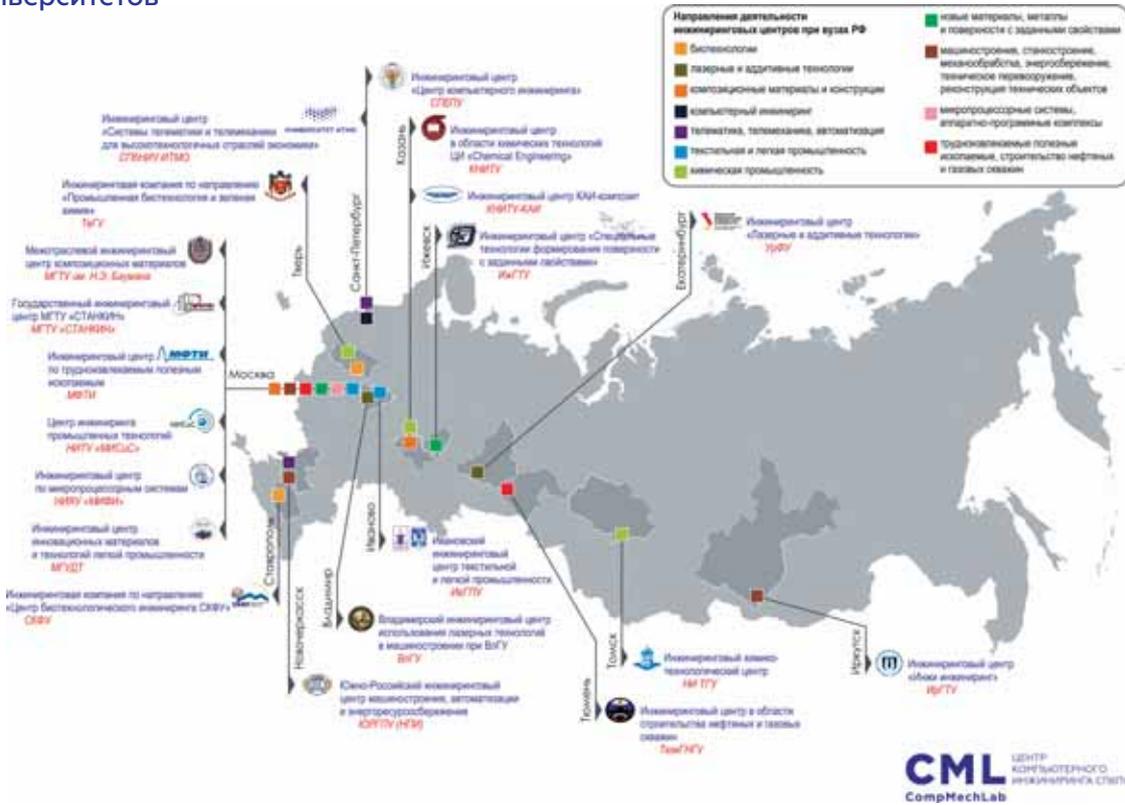
Настоящее издание подготовлено в рамках скоординированных и целенаправленных усилий, которые прилагаются в последние три-четыре года заинтересованными министерствами и ведомствами, институтами развития, ведущими университетами, научно-исследовательскими центрами, инженерными центрами и технологическими компаниями, экспертным и профессиональным сообществом по определению, развитию и применению в отраслях отечественной промышленности наиболее перспективных технологий, точнее – передовых производственных технологий (Advanced Manufacturing Technology).

Стартом этого процесса в России послужил проект Фонда «Центр стратегических разработок «Северо-Запад» и Министерства промышленности и торговли РФ «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации на долгосрочную перспективу» (2011–2012 гг., руководитель проекта – В.Н. Княгинин), по итогам которого была сформирована новая повестка промышленно-технологического развития страны. В частности, во многом на основе серии дискуссионных докладов («зеленых книг») [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8], а также ряда последовавших совещаний с участием руководителей федеральных органов исполнительной власти¹ инженеринговая деятельность стала самостоятельным объектом государственной политики. В 2013 г. был утвержден план мероприятий («дорожная карта») в области инженеринга и промышленного дизайна [9], а в 2014 г. – подпрограмма 19 «Развитие инженеринговой деятельности и промышленного дизайна» государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» [10].

В соответствии с принятыми правительственными документами в 2013, 2014 и 2015 гг. Министерство промышленности и торговли РФ и Министерство образования и науки РФ провели три совместных конкурса среди ведущих вузов страны по созданию и развитию инженеринговых центров. По итогам первого конкурса в сентябре 2013 г. из 96 заявок от 91 университета было отобрано 11 победителей, в том числе Центр компьютерного инженеринга от Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ИЦ ЦКИ СПбПУ). По итогам второго конкурса в сентябре 2014 г. из 54 заявок было отобрано 9 проектов. В третьем конкурсе, объявленном в апреле 2015 г., приняли участие 79 университетов. Усилия на федеральном уровне также находят подкрепление в субъектах Федерации в виде создания региональных центров инженеринга при поддержке со стороны Министерства экономического развития РФ (по данным открытых источников информации, создано 33 центра в 24 регионах; мониторинг их деятельности осуществляет Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере). Из 33 региональных центров 14 работают по межотраслевой модели (оказывают консультационные услуги – проводят аудиты, маркетинговые исследования, разрабатывают программы модернизации для субъектов малого и среднего предпринимательства), 19 являются отраслевыми (имеют комплекс оборудования и в дополнение к консалтингу занимаются разработкой новых технических и технологических решений).

¹ Наибольшее в этом смысле значение имело совместное заседание Координационного совета по промышленности и Совета по инженерингу и промышленному дизайну Минпромторга России, прошедшее в Екатеринбурге в рамках Международной промышленной выставки ИННОПРОМ-2014. В его ходе была подчеркнута связующая роль инженеринга между наукой и промышленностью и отмечено, что развитие этой сферы деятельности позволит России занять лидирующее место по выпуску высокотехнологичной промышленной продукции.

Рисунок 1. Инжиниринговые центры, созданные в 2013–2014 гг. на базе ведущих университетов



Источник: [11; 12]

Рисунок 2. Межотраслевые и отраслевые региональные центры инжиниринга



Источник: [11; 12]

В январе 2015 г. Министр промышленности и торговли РФ Д.В. Мантуров и Министр образования и науки РФ Д.В. Ливанов посетили Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. В ходе визита проректор по перспективным проектам и руководитель Инжинирингового центра А.И. Боровков и заместитель руководителя Инжинирингового центра О.И. Клявин представили министрам и сопровождающим их гостям структуру и организацию деятельности ИЦ ЦКИ СПбПУ в интересах высокотехнологичных компаний и результаты решения многочисленных мультидисциплинарных задач из разных отраслей промышленности.

Рисунок 3. Визит Министра промышленности и торговли РФ Д.В. Мантурова и Министра образования и науки РФ Д.В. Ливанова в Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого 23 января 2015 г.



На фотографии в ИЦ ЦКИ СПбПУ: 1-й ряд (справа налево) – Министр образования и науки РФ Д.В. Ливанов, Министр промышленности и торговли РФ Д.В. Мантуров, ректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого А.И. Рудской; 2-й ряд (справа налево) – зам. Министра образования и науки РФ А.Б. Повалко; первый проректор – проректор по научной работе МФТИ О.А. Горшков; зам. ген. директора по инновационному развитию УК «Оборонпром», зам. ген. директора ОАО «Межведомственный аналитический центр» В.И. Довгий; зам. Министра образования и науки РФ Л.М. Огородова; 3-й ряд (справа налево) – председатель Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга А.С. Максимов; зам. председателя правления ООО «УК «РОСНАНО»», ген. директор Фонда инфраструктурных и образовательных программ (ФИОП) А.Г. Свиженко; управляющий директор Департамента реализации стратегии развития инфраструктуры и инжиниринговых компаний ФИОП А.В. Гостомельский



Выступление руководителя Центра компьютерного инжиниринга проф. А.И. Боровкова



Выступление зам. руководителя Центра компьютерного инжиниринга О.И. Клявина



Беседа Д.В. Мантурова с руководством ИЦ ЦКИ СПбПУ об организации работ, выполняемых в рамках проекта государственного значения «Кортеж» – разработка элементов каркаса кузова и конструктивных элементов отечественных автомобилей «Лимузин», «Седан», «Внедорожник» и «Микроавтобус» на базе единой модульной платформы, предназначенной для перевозки и сопровождения первых лиц государства, а также других лиц, подлежащих государственной охране



Демонстрация металлических элементов конструкций, спроектированных на основе принципов бионического дизайна, с помощью технологий компьютерного инжиниринга и топологической оптимизации, которые удовлетворяют всем необходимым требованиям и в 2,5 раза легче исходных конструкций, используемых на практике

Источник: [13] / Фото: С.С. Агафонов / Медиа-центр СПбПУ

По итогам визита в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого под председательством министров состоялось рабочее совещание «Реализация проектов по созданию и развитию инжиниринговых центров на базе университетов России» в рамках совместного проекта Минобрнауки и Минпромторга. В ходе совещания было заявлено, что при проведении третьего конкурса среди вузов весной – летом 2015 г. особое внимание будет уделено тому, чтобы работа инжиниринговых центров была тесно увязана с задачей импортозамещения и импортоопережения, поставленной Правительством РФ [14].

В марте 2015 г. в Министерстве образования и науки РФ состоялось совещание по подведению промежуточных итогов реализации проектов создания и развития инжиниринговых центров на базе университетов – победителей конкурса 2013 г. По оценке, проведенной организацией-монитором ОАО «Межведомственный аналитический центр» (МАЦ), Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого занял первое место среди инжиниринговых центров и набрал максимальное количество баллов (100 баллов) по каждому из параметров (установив тем самым абсолютный рекорд):

- отношение объема услуг реальному сектору экономики в 2014 г. к размеру субсидии;
- обязательное создание юридического лица – малого инновационного предприятия;
- отношение объема услуг, оказанных юридическим лицом (созданным малым инновационным предприятием) реальному сектору экономики, к размеру субсидии;
- структура расходования субсидии (инвестиционные затраты); затраты на зарплату – наименьший приоритет, затраты на развитие – наивысший приоритет.

Рисунок 4. Оценка промежуточных итогов деятельности инжиниринговых центров, созданных в 2013 г. при вузах

№	Наименование вуза	Балльная оценка соотношения объема услуг реальному сектору экономики к размеру субсидии	Балльная оценка соотношения объема услуг юр. лица реальному сектору экономики к размеру субсидии	Балльная оценка по инвестиционным затратам	Балльная оценка по юр. лицу	Оценка итогов 2014 г. в баллах (из 100 баллов)
1	СПбГПУ	100	100	100	100	100
2	МИФИ	100	100	25	100	85
3	МФТИ	75	75	100	100	82,5
4	КНИТУ КХТИ	75	25	100	100	67,5
5	КНИТУ КАИ	100	0	100	0	60
6	МГТУ Баумана	100	25	0	100	57,5
7	МГТУ «СТАНКИН»	100	0	0	100	50
8	УРФУ	50	0	50	100	40
9	ИрГТУ	25	0	50	100	30
10	МИСиС	0	0	25	100	15
11	ВлГУ	0	0	50	0	10

Источник: [12; 15]

Новая повестка промышленно-технологического развития России, конечно, не ограничивается лишь формированием сети инжиниринговых центров. По сути, сегодня стоит вопрос о развитии передовых производственных технологий (ППТ) – совокупности новых, с высоким потенциалом, уже зарекомендовавших себя, демонстрирующих де-факто стремительное развитие, но имеющих пока по сравнению с традиционными («конвенциональными») технологиями относительно небольшое распространение, новых материалов, методов и процессов, которые используются для производства глобально конкурентоспособных и востребованных на мировом рынке продуктов или изделий (машин, конструкций, агрегатов, приборов, установок и т. д.).

Для России важность развития и применения ППТ определяется тем, что, по мнению экспертов, в отдельных сегментах передовых производственных технологий у страны имеются заделы мирового уровня [16, с. 43; 17, с. 24–26]. Это тем более важно, если учитывать, что ППТ не просто совершенствуют, а принципиально меняют структуру производства, создают новые рынки и целые отрасли, способствуют росту производительности труда, повышению конкурентоспособности экономики отдельных стран. Нередко они выступают драйверами смены технологических и экономических укладов, так как обладают потенциалом качественного обновления производственных процессов, методов их организации и вовлечения трудовых ресурсов нового поколения [18, с. 17].

При этом, как показывает история, переход к массовому внедрению любого нового пакета производственных технологий всегда проходил через экономический кризис. Не является исключением и текущий момент смены технологий: кризис конца 2000-х – начала 2010-х гг. обесценил капиталовложения в старые основные промышленные фонды и позволил отказаться от традиционных (конвенциональных) технологий, создал предпосылки для их замены на новый пакет неконвенциональных технологий, заведомо более производительных, дающих их обладателям бесспорные конкурентные преимущества, – ППТ [19, с. 221].

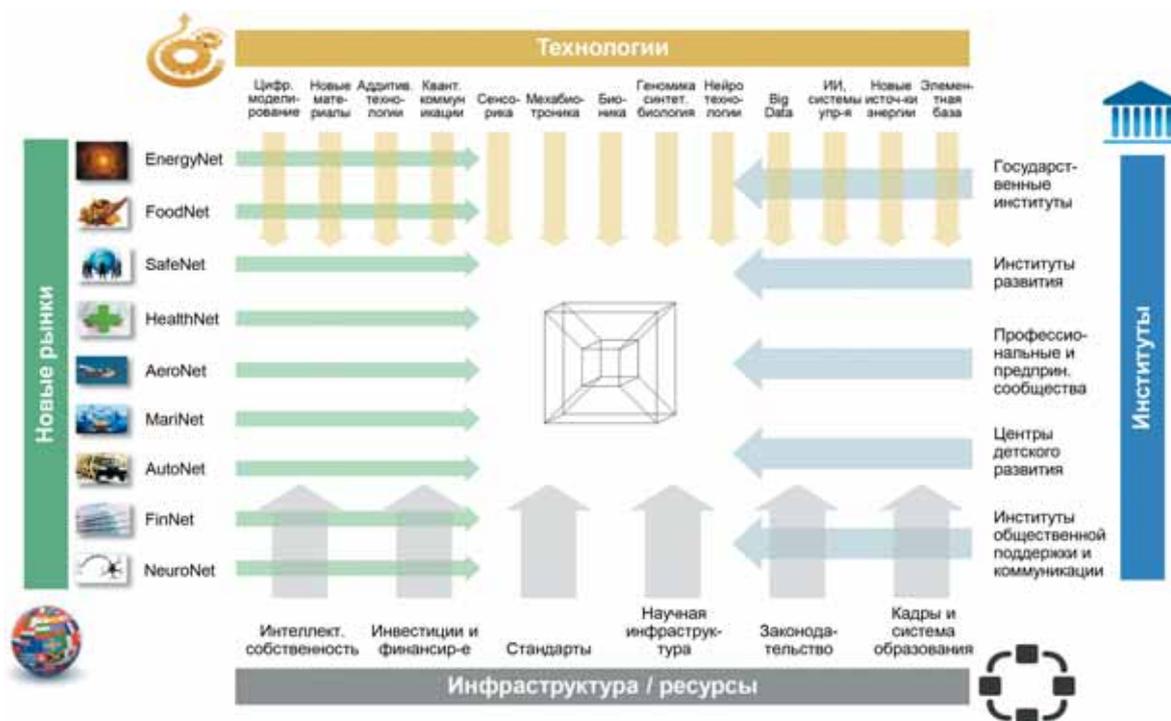
Все эти факторы обусловили создание первого в России Института передовых производственных технологий (ИППТ) на базе двух ведущих подразделений Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого – Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» (руководитель – проф. А.И. Боровков) и Института лазерных и сварочных технологий (руководитель – проф. Г.А. Туричин). Миссия ИППТ – генерация, применение и распространение глобально конкурентоспособных меж-, мульти- и трансдисциплинарных политехнических знаний, разработка, развитие и эффективное применение передовых производственных технологий, разработка продукции нового поколения, развитие практико-ориентированных технологий обучения и подготовки магистров и аспирантов в рамках выполнения НИОКР по заказам предприятий высокотехнологичной промышленности. Назначение ИППТ – решение сверхактуальных проблем государственного значения (импортозамещение / импортоопережение высокотехнологичной зарубежной продукции, реинжиниринг отраслей промышленности, увеличение доли экспорта инжиниринговых услуг и т. д.), выполнение НИОКР по заказам предприятий высокотехнологичной промышленности, выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области передовых производственных технологий, разработка и реализация образовательных программ магистров, подготовка научных кадров через аспирантуру [20].

Сегодня проблематика развития передовых производственных технологий в России тесно смыкается с Национальной технологической инициативой (НТИ) – программой мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства страны к 2035 г., которую в Послании Федеральному Собранию 4 декабря 2014 г. предложил запустить Президент РФ В.В. Путин. Фактически ППТ представляют собой «промышленно ориентированное» ядро НТИ, позволяющее решать национально значимые задачи, в особенности снижение импортозависимости от зарубежных производителей [подробнее о роли Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ в импортозамещении и импортоопережении см. 21].

Логика Национальной технологической инициативы заключается в том, чтобы, во-первых, определить рынки, которые сегодня не существуют и которые возникнут в ближайшие 20 лет. Критериями выбора выступают ориентированность на потребности людей, а не бизнеса (B2C – Business-to-Consumer), потенциальный объем новых рынков к 2035 г. – не менее 100 млрд долл., отсутствие общепринятых или устоявшихся технологических стандартов, сетевой принцип организации (фактически те или иные посредники заменяются на управляющее программное обеспечение), важность для России с точки зрения обеспечения базовых потребностей и безопасности, наличие условий в стране для достижения конкурентных преимуществ и занятия значимой доли рынка (в том числе наличие технологических предпринимателей с амбициями создать компании-лидеры на новом высокотехнологичном рынке). Во-вторых, необходимо определить ключевые технологии, за счет которых будут созданы продукты и сервисы на новых рынках и, в третьих, разработать комплекс мер поддержки и стимулирования, включая институциональные, финансовые и исследовательские инструменты, позволяющих вырастить национальные компании-чемпионы на новых рынках [22].

На стыке этих трех составляющих располагается матрица Национальной технологической инициативы (разработана АНО «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов»), в центре которой располагаются системообразующие документы – «дорожные карты». Их подготовка осуществляется 10 рабочими группами, тематика работы которых примерно соответствует отобранным рынкам: AeroNet, AutoNet, MariNet, EnergyNet, NeuroNet, HealthNet, FoodNet, «Цифровое проектирование и моделирование, новые материалы и аддитивные технологии», «Университетские города НТИ», «Кружковое движение». На заседании Президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России, состоявшемся 9 июня 2015 г., лидером единственной «технологической группы» – рабочей группы «Цифровое проектирование и моделирование, новые материалы и аддитивные технологии» указан А.И. Боровков, руководитель Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга», проректор по перспективным проектам Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, основатель группы компаний CompMechLab®.

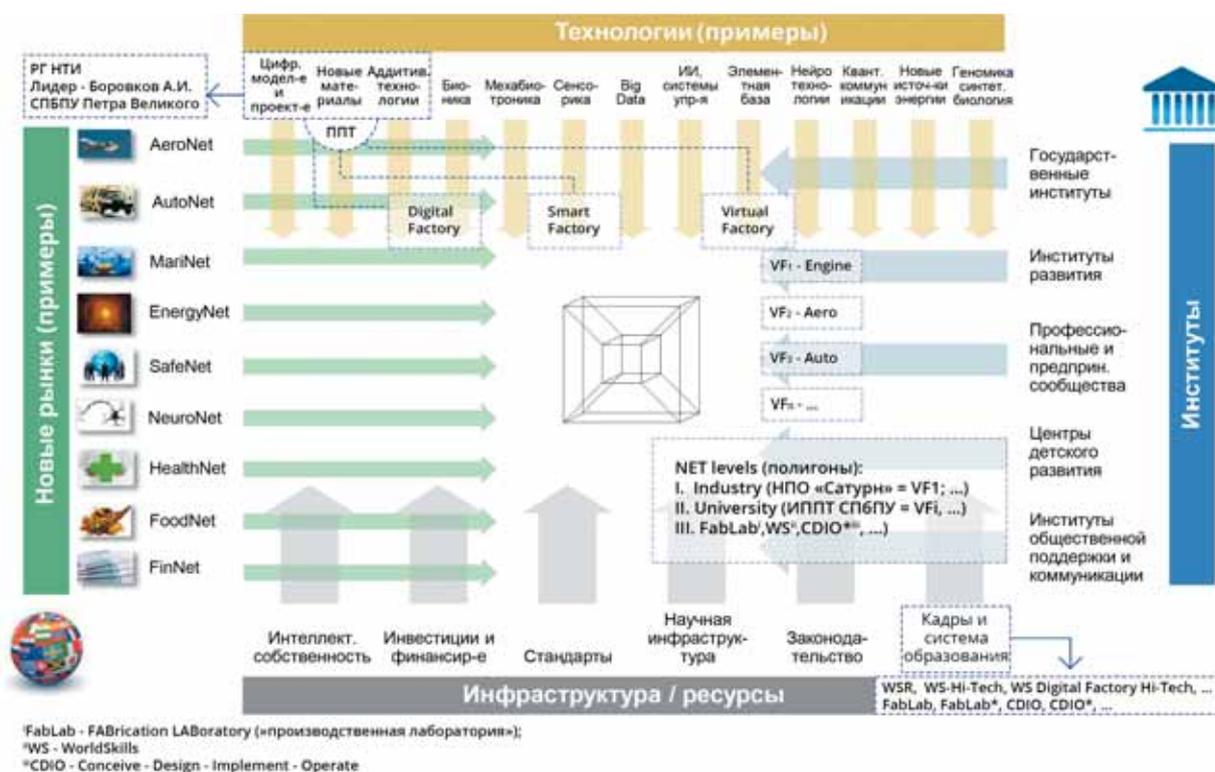
Рисунок 5. Матрица Национальной технологической инициативы



Источник: [23]

При этом, с точки зрения Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ, именно цифровое проектирование и моделирование, новые материалы и аддитивные технологии являются ядром для формирования «фабрик будущего» (Factories of the Future) – Digital / Smart / Virtual Factory. Из таких «цифровых производств» может быть сформирована распределенная сеть DigitalFactory.Net, которая в свою очередь выступит «кровеносной системой» для основных рынков будущего, указанных в Национальной технологической инициативе. Смежными технологиями, важными для движения в сторону Digital Factory, выступают бионика и мехабиотроника (которые, строго говоря, являются областями научных знаний, а не технологиями); в сторону Smart / Virtual Factory – сенсорика, системы управления, Big Data, индустриальный интернет и другие передовые технологии. В этом смысле Институт передовых производственных технологий СПбПУ – это фактически полигон Digital / Smart / Virtual Factory, а главные рынки будущего, на которых он будет работать, – AutoNet, AeroNet, EngineNet и другие.

Рисунок 6. Матрица Национальной технологической инициативы в понимании Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ и рабочей группы «Цифровое проектирование и моделирование, новые материалы и аддитивные технологии»



Источник: Институт передовых производственных технологий СПбПУ по материалам [23]

Особое внимание в ходе работы группы «Цифровое проектирование и моделирование, новые материалы, аддитивные технологии» над «дорожными картами» предполагается уделить развитию бионического дизайна – концепции, впервые сформулированной А.И. Боровковым в сентябре 2014 г. в докладе на национальной выставке ВУЗПРОМЭКСПО-2014 [24]. Во время визита в Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ 23 января 2015 г. Министр промышленности и торговли РФ Д.В. Мантуров подчеркнул, что на основе продемонстрированных в ИЦ ЦКИ компетенций «основным направлением, которое нужно развивать, является объединение бионического дизайна, компьютерного инжиниринга и аддитивных технологий. Сегодня <...> мы поняли, что это очень перспективное направление и здесь, в Политехническом университете, оно точно будет развиваться» [13]. В апреле 2015 г. при объявлении третьего конкурса среди вузов по созданию и развитию инжиниринговых центров Минобрнауки России указало бионический дизайн как «передовой инновационный подход при решении актуальных задач производственного сектора» [25].

С точки зрения Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ, именно в настоящий момент времени наиболее целесообразно сосредоточить усилия на том, чтобы радикально переосмыслить подходы к проектированию и созданию конкурентоспособных (best-in-class) продуктов и изделий за счет использования принципов бионического дизайна. Это обусловлено тем, что сейчас стремительное развитие демонстрируют те технологические тренды, в основе которых лежали сознательно выработанные и запущенные инициативы в промышленно развитых странах – по суперкомпьютерному инжинирингу (High Performance Computing Initiative 2003 г., Department of Energy High-End Computing Revitalization Act 2004 г., U.S. Manufacturing–Global Leadership through Modeling and Simulation 2009 г., European High-Performance Computing Strategy 2012 г.), передовым производственным технологиям (Advanced Manufacturing Partnership 2011 г. и Advanced Manufacturing Partnership 2.0 2013 г.), передовым материалам (Materials Genome Initiative 2011 г.), цифровому производству (Factories of the Future 2008 г., Industrie 4.0 2013 г.) и др.

Настоящее издание продолжает линию на публичное обсуждение тематики промышленно-технологического развития России, заложенную серией дискуссионных докладов («зеленых книг») и работами, посвященными рынку высокотехнологичного компьютерного инжиниринга [3; 26] и новым производственным технологиям [27]. Доклад призван способствовать лучшему пониманию того, что собой представляет бионический дизайн, стимулировать дискуссию о его развитии и наметить подходы к его эффективному применению с целью обеспечения ключевых конкурентных преимуществ промышленной продукции.

За последний год с июля 2014 г. по июнь 2015 г. тема бионического дизайна, как в целом, так и ее различные аспекты, обсуждались со специалистами, которым авторы работы выражают благодарность: Д.В. Мантурову, Г.С. Никитину, А.А. Михееву, В.С. Осьмакову, Ю.Б. Ханьжиной (Министерство промышленности и торговли РФ), Д.В. Ливанову, А.Б. Повалко, Л.М. Огородовой, С.В. Салихову (Министерство образования и науки РФ), В.Н. Княгинину (Фонд «Центр стратегических разработок»), А.К. Пономареву (Сколковский институт науки и технологий), Н.Ю. Кутееву (ФБУ «Российское технологическое агентство»), Д.Ю. Колодяжному, Ф.А. Шамраю (АО «Объединенная двигателестроительная корпорация»), М.В. Нагайцеву (ФГУП «НАМИ»), А.Г. Свинарченко, А.В. Гостомельскому (Фонд инфраструктурных и образовательных программ РОСНАНО), А.И. Рудскому, В.А. Пальмову, Д.А. Индейцеву, Б.А. Смольникову, Ю.Я. Болдыреву, С.Ф. Бурдакову, А.Б. Фрейдину, Г.А. Туричину, О.И. Клявину, А.С. Немову, А.А. Михайлову, Е.В. Белослудцеву (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого).

Введение. Определение бионического дизайна

Одним из ключевых трендов технологического развития на современном этапе является использование бионических принципов в процессе проектирования и создания продуктов нового поколения. Этот тренд затрагивает архитектуру, промышленный дизайн, технику и медицину. На основе изученных литературных источников авторы предлагают выделить два основных подхода к применению бионических принципов – традиционный и современный.

Традиционный подход: бионика, биомиметика, биомимикрия

В рамках традиционного подхода наиболее часто используемыми терминами для обозначения «бионического тренда» являются «бионика», «биомиметика» и «биомимикрия». В английском языке чаще всего используются слова и словосочетания *bionics*, *biomimetics*, *biomimesis*, *biomimicry*, *bionic design*, *bionically / biologically / bio-inspired design / engineering*. При этом различные авторы вкладывают различные оттенки смысла в эти понятия, а принятых всеми определений не существует.

Бионика (от греч. βίωσις – элемент жизни) – наука, пограничная между биологией и техникой, решающая инженерные задачи на основе анализа структуры и жизнедеятельности организмов [28, с. 359–361]. В английском языке термин *bionics* обычно рассматривают как соединение слов *biology* (биология) и *technics* (техника) или *biology* и *electronics* (электроника). Считается, что автором слова «бионика» является американский военный врач Джек Эллвуд Стил (1924–2009), предложивший его в 1958 г. в ходе своей работы в исследовательской лаборатории авиационной медицины на авиабазе Райт-Паттерсон (штат Огайо) [29].

Биомиметика (от др.-греч. βίος – жизнь и μίμησις – подражание) – создание устройств, приборов, механизмов или технологий, идея и основные элементы которых заимствуются из живой природы [30, с. 29]. Термин был предложен в 1969 г. американским биофизиком и инженером Отто Гербертом Шмиттом (1913–1998) в научной статье, а уже в 1974 г. это слово вошло в словарь Webster. С самого начала понятие «биомиметика» было тесно связано с медициной – веществами и материалами, схожими с биологическими (ферментами, протеинами), и процессами их искусственного образования, которые были бы похожи на биологические процессы (синтез, фотосинтез) [31, р. 122; 32, с. 120].

Биомимикрия (от др.-греч. βίος – жизнь и μίμησις – подражание) – практически то же, что и биомиметика, но с особым акцентом на принципах устойчивого развития (сохранение природных ресурсов и минимизация негативного воздействия на окружающую среду при создании сложных технических систем). Термин обычно связывают с именем американского ученого Джанин М. Беньюс (р. 1958), которая в 1997 г. опубликовала книгу «Биомимикрия: инновации, вдохновленные природой» [33]. В ней обосновывалась идея того, что многие проблемы, с которыми сталкивается человек, подобны тем, с которыми сталкивались живые организмы на протяжении нескольких миллиардов лет эволюции, и необходимо изучать и применять эффективные и действенные решения природы в технических системах.

Акцент на принципах устойчивого развития нашел отражение в 9 базовых принципах биомимикрии:

1. Функционирование благодаря солнечному свету.
2. Использование только той энергии, которая необходима.
3. Форма определяется функциями.
4. Всё перерабатывается.
5. Поощрение взаимодействия.
6. Многообразие как основа всего.

7. Всё, что создается в природе, ориентировано на условия конкретной местности.
8. Всё лишнее убирается изнутри.
9. Максимальное использование ограниченных возможностей [33, р. 1–10].

В последнее время в научной и научно-популярной литературе всё чаще наблюдается тенденция использовать указанные выше термины как синонимы друг друга.

Как видно из определений, их все объединяет идея заимствования принципов организации, свойств, функций, структур и материалов из живой природы с целью улучшения существующих и создания не менее совершенных технических систем.

Само по себе заимствование зародилось давно: попытки изготовления конструкций по примеру природных были описаны еще в древнегреческих мифах, однако пионером в этой области по праву считается Леонардо да Винчи (1452–1519), интересовавшийся техникой птичьего полета с целью создания устройства, которое помогло бы человеку передвигаться в воздухе. Свои наблюдения он описал в «Кодексе о полете птицы» (1505). Однако на тот момент технологии не были столь совершенны, чтобы позволить проектирование подобных систем, так как они были достаточно сложны и требовали использования инструментов, которыми наука и техника на тот момент еще не обладала. Поэтому подобные попытки были достаточно редки и не носили массовый характер. Отнюдь не претендуя на исчерпывающий список, следует упомянуть следующие наиболее важные и характерные факты, которые могут служить в качестве основных реперных точек развития бионики – биомиметики – биомимикрии:

1. В 1851 г. британский архитектор Джозеф Пакстон (1803–1865) при проектировании конструкции железных перекрытий Хрустального дворца в Лондоне использовал принцип строения цветка лилии, у которого незначительная по площади опора выдерживает большой вес. Это позволило создать изящную металлическую конструкцию и использовать стеклянные панели, что прославило проект своей оригинальностью [34].
2. В 1883 г. испанский архитектор Антонио Гауди (1852–1926) при создании храма Святого Семейства в Барселоне использовал в качестве прототипов декоративных элементов, которые не несут функциональной нагрузки, представителей флоры и фауны – листья, деревья, цветы, ракушки.
3. В 1903 г. братья Райт использовали принцип птичьего полета и сконструировали механизм, имитировавший крылья птицы, что положило начало современному авиастроению.
4. В 1955 г. швейцарский инженер Жорж де Местраль (1907–1990) запатентовал ленту «велькро» (в России более известна как «липучка»): застежка имитирует структуру репейника, представляя собой две текстильные ленты с микрокрючками на одной и микропетлями на другой ленте и является простым и при этом достаточно надежным крепежным элементом, который применяется, в частности, на Международной космической станции для крепления предметов к стенам. Сначала «липучка» использовалась в основном космонавтами, аквалангистами и горнолыжниками, но позже получила широчайшее распространение в текстильной промышленности, став привычной деталью в одежде и обуви. «Липучка» остается одним из самых коммерчески успешных примеров биомиметики.
5. В 1986 г. Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США (НАСА) и компания 3М протестировали технологическое решение для улучшения аэродинамики космических кораблей – нанесение специального рифления на поверхность корпуса летательного аппарата, что имитировало кожу акулы – животного, строение тела которого известно своими гидродинамическими свойствами. В настоящее время авиакомпания Lufthansa совершенствует эту технологию с тем, чтобы обеспечить еще и меньший расход топлива.

6. В 1994 г. сотрудниками Боннского университета была запатентована технология под торговой маркой Lotus Effect («Эффект лотоса»), а через пять лет – выпущена первая в мире краска для наружных работ Lotusan. Прототипом для ее создания послужили листья лотоса, которые имеют водоотталкивающую поверхность и способны к самоочищению. У поверхности, обработанной краской Lotusan, подобный эффект достигается благодаря входящим в нее гидрофобным наночастицам оксида кремния, из которых после высыхания краски формируется такая же «шипастая» поверхность, что и на листьях растения, после чего поверхность приобретает водоотталкивающие свойства и остается чистой на протяжении долгого времени [35].
7. В 1996 г. архитектор Мик Пирс (р. 1938) разработал проект центра «Истгейт» в г. Хараре (Зимбабве), в котором принцип вентиляционных систем здания был заимствован у африканских термитников, которые являются самоохлаждающимися. Вместо традиционной вентиляции в торговом и офисном центре проведена особая система труб, которые естественным образом подводят холодный воздух. Стоимость такой системы примерно в 10 раз меньше традиционной, а энергопотребление – на 35% меньше. Здание по сей день считается образцом «зеленой» архитектуры.

Существует два основных алгоритма, в соответствии с которыми может происходить заимствование принципов организации, свойств, функций, структур и материалов из живой природы при создании инновационной продукции, – «восходящий» (bottom-up, solution-driven, biology push), когда отправной точкой служат фундаментальные исследования в биологии, лежащие в основе дальнейшего применения в технических решениях, и «нисходящий» (top-down, problem-driven, technology pull), когда процесс начинается с определения инженерной проблемы, а поиск решения осуществляется с привлечением наработок биологии или примеров из живой природы [36, р. 606–622; 37].

Таблица 1. Алгоритмы заимствования из живой природы при создании инновационной продукции

Восходящий алгоритм		Нисходящий алгоритм	
Отправная точка	Фундаментальные исследования в биологии	Отправная точка	Определение инженерной проблемы
Проведение исследований	Осмысление биологических моделей (аналогов)	Поиск аналогов	Поиск биологических моделей (аналогов)
Выявление биологических принципов	Определение принципов в биологических моделях (аналогах)	Выбор биологических принципов, пригодных для инженерно-технической реализации	Анализ наиболее подходящих принципов, выявленных в биологических моделях (аналогах)
Абстрагирование	Перевод биологического принципа в универсальную форму; приведение биологического решения в пригодную для инженеров форму	Абстрагирование	Перевод биологического принципа в универсальную форму; приведение биологического решения в пригодную для инженеров форму
Разработка продукта	Применение биологических принципов в технических решениях	Разработка продукта	Применение биологических принципов в технических решениях

Источник: [38]

Современный подход: бионический дизайн

В отличие от подхода, рассмотренного выше, современный подход имеет не столь длительную историю, поскольку главным образом связан с достижениями широкого спектра компьютерных технологий и развитием передовых производственных технологий. Наилучшим образом его суть может быть отражена на следующем примере.

В человеческом организме главным «конструкционным элементом», несущим нагрузку, являются кости. Известно, что они гармонично сочетают такие противоположные свойства, как механическая прочность, физическая нелинейность и «функциональная пластичность». Отметим, что один кубический дюйм кости (16,39 кубических сантиметра) способен выдержать нагрузку свыше 8 тонн [39].

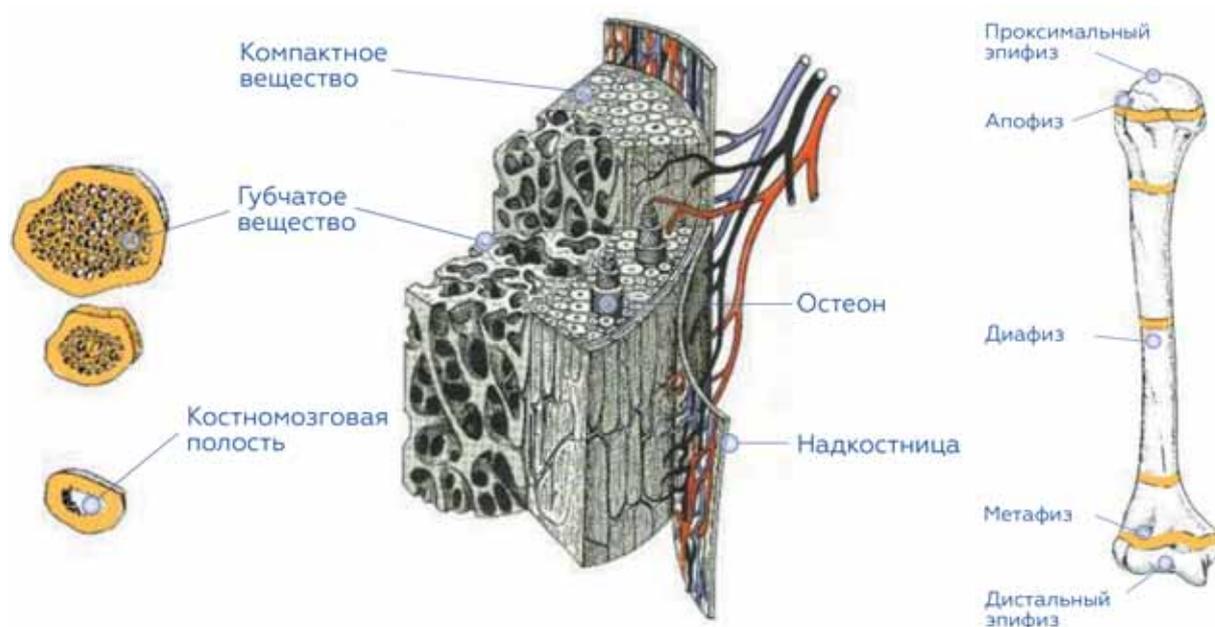
Это обеспечивается, в первую очередь, особой структурой костной ткани, которую по праву можно характеризовать как «композитную» и в которой обычно выделяют пять уровней:

1. Биополимерная макромолекула тропоколлагена и неорганические кристаллы.
2. Микрофибриллы коллагена, образуемые пятью молекулами тропоколлагена.
3. Сочетание микрофибрилл коллагена (говоря техническим языком, выполняют функцию матрицы) с кристаллами гидроксиапатита («армирующие элементы»); в 1 грамме кости общая площадь кристаллов гидроксиапатита составляет около 250 квадратных метров, а для всей костной ткани скелета – около 2 квадратных километров.
4. Ламеллы – тонкие изогнутые пластинки, в которые собираются фибриллы, армированные кристаллами гидроксиапатита.
5. Остеон (гаверсова система) – структурная единица костной ткани, состоящая из 5–20 концентрически расположенных цилиндрических ламелл с разными направлениями и углами навивки. В центре расположен гаверсов канал, где проходят кровеносные сосуды и нервы. Каналы соединяются друг с другом радиальными каналами, этим же осуществляется и связь с сосудами надкостницы и костным мозгом. Остеоны связаны между собой мукополисахаридами, а также «сшиты» переходящими из слоя в слой волокнами и образуют пространственно переплетенную систему, что позволяет рассматривать их как армирующий элемент конструкции. Между остеонами залегают вставочные (интерстициальные, промежуточные) пластинки [40; 41; 42, с. 98].

Выделяют два типа костной ткани – компактную (кортикальную) и трабекулярную (пористую, губчатую, спонгиозную). Первая образует внешнюю оболочку вокруг всех костей, она более плотная и менее пористая, а ее главная функция – выдерживать силовую нагрузку. Вторая образована тонкими костными перекладинами (трабекулами) и расположена глубже. Помимо костной ткани выделяют хрящевую и соединительную ткань. Последняя служит основой для надкостницы – покрывает компактную ткань сверху, через нее осуществляется питание кости и ее иннервация, а во внутреннем слое содержатся костеобразующие клетки – остеобласты, обеспечивающие рост развивающихся молодых костей в толщину. Другими наиболее важными клетками являются остециты – основные клетки полностью сформировавшейся кости и остеокласты, функция которых заключается в поглощении костной ткани [43, с. 28–30].

Микроструктура кости зависит от ее функции. В костях, несущих большую физическую нагрузку, вставочных пластинок мало и остеоны расположены очень густо. В перекладинах губчатого вещества пластинчатое строение менее ясно, чем в компактном, а каналы остеонов почти отсутствуют. На регулярную повышенную нагрузку кость «отвечает» увеличением числа остеонов, приобретая более совершенную структуру и прочность. Это можно хорошо проследить на примере трубчатых костей (бедренные и плечевые кости, фаланги пальцев), в которых различают тело (диафиз) и два конца (эпифизы). На поверхностях стыка кости в большей степени подвержены сжимающим нагрузкам, в результате чего эпифизы состоят из трабекулярной ткани, поскольку в данном случае требуется большая гибкость и эластичность, нежели жесткость. Диафиз же, наоборот, подвержен одновременно продольному сжатию, изгибу и кручению (сложное напряженно-деформированное состояние), а потому состоит из компактной ткани [44, р. 15; 45].

Рисунок 7. Строение кости



Источник: [46]

Очевидно, что сформировавшаяся структура кости представляет собой результат эволюции, проходившей в течение сотен миллионов лет с момента выхода позвоночных на сушу. Аналогичные стадии этих изменений кости проходят в течение онтогенеза человека с момента зачатия до примерно 18–20-летнего возраста – соединительнотканную (перепончатую), хрящевую и костную. Хрящевую стадию развития скелета проходят кости туловища, конечностей и основания черепа. Кости свода черепа, большинство костей лица, медиальная пластинка крыловидного отростка клиновидной кости и средняя часть ключицы развиваются из соединительной ткани, минуя хрящевую стадию развития скелета. Кости, развивающиеся на основе соединительной ткани, называются первичными, а кости, возникающие на месте хряща, – вторичными [45].

Рисунок 8. Онтогенез трубчатой кости



Источник: [47]

В результате можно говорить о том, что так или иначе конструкция костей оказывается оптимальной для выполнения тех функций, которые она выполняет в организме, причем это утверждение справедливо и для скелета в целом. По данным американских ученых, плотность костей скелета современного человека на 50–75% меньше, чем плотность костей австралопитека африканского (3,5–2,4 млн лет назад), парантропа робустуса (2–1,2 млн лет назад), неандертальца (600–350 тыс. лет назад), ранних *Homo sapiens* (70–60 тыс. лет назад) и даже людей, живших 20 тыс. лет назад незадолго до начала нынешнего послеледникового периода. Такие изменения – а они, по доступным сведениям, произошли не постепенно, но в течение относительно короткого периода времени – связывают с переходом от бродячего образа жизни (форма хозяйственной деятельности – собирательство и охота) к оседлому (основа жизнедеятельности – земледелие) [48].

Одна из актуальных задач-вызовов – получить если не аналогичные, то, по крайней мере, похожие результаты – создание сложных инженерных конструкций и технических систем, оптимальных с точки зрения множества зачастую конфликтующих критериев (размеры, форма, вес, прочность, жесткость, характеристики устойчивости, тепловые, термомеханические, динамические, аэрогидродинамические, гидравлические, усталостные, эргономические и т. д., характеристики долговечности и износостойкости, наконец, экономические характеристики, например, стоимость изготовления).

При этом оптимальные конструкции важно получить за время, в миллионы раз меньшее по сравнению с эволюцией или онтогенезом. Это становится возможным в настоящее время за счет применения и эффективного сочетания программных систем оптимизации (Computer-Aided Optimization, CAO) – многопараметрической, топологической, многокритериальной, мультидисциплинарной и т. д. и, конечно, передовых технологий аддитивного производства.

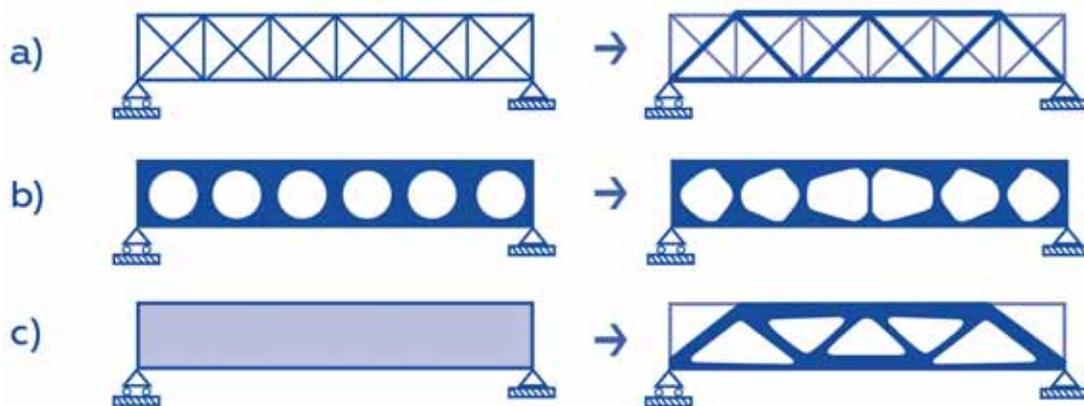
Главную роль в этом процессе играют технологии топологической оптимизации – математического подхода, основанного на описании пространственной (3D) задачи оптимизации с помощью уравнений в частных производных. Главный результат решения задачи оптимизации – оптимальное распределение материала в ограниченном пространстве (пространстве, которое занимает элемент конструкции) с учетом действующих нагрузок и граничных условий, включая условия сопряжения с другими элементами конструкции, таким образом, чтобы решение удовлетворяло требуемым условиям, например, критериям жесткости, прочности, а элемент конструкции имел бы наименьший вес [49]. В топологической оптимизации обычно выделяют три основных типа – оптимизацию размеров (size optimization), формы (shape optimization) и топографии (topography optimization).

Оптимизация размеров касается нахождения оптимальных границ объекта за счет варьирования таких переменных проектирования, как переменные толщины стенок различных конструктивных элементов, переменные толщины слоев и «перемычек» в ячеистых структурах, площади поперечного сечения и др.

Оптимизация формы происходит за счет изменения ранее заданных внешних границ, в частности, изменения внешних контуров многосвязных тел и таких параметров, как галтели, выточки и углубления, отверстия и др.

Топографическая оптимизация – вариант топологической оптимизации, применимый к двумерным объектам (пластины, оболочки, вообще говоря, произвольные поверхности), толщина которых значительно меньше характерных поперечных (габаритных) размеров [49; 50, р. 4; 51]. Результатом топографической оптимизации, как правило, являются локальные утолщения основной (несущей) поверхности.

Рисунок 9. Виды оптимизации: размеров (а), формы (b), топологическая (с)



Источник: Инжиниринговый центр
«Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ по материалам [52, р. 2]

Сегодня компьютерные технологии оптимизации тесно вплетены в процесс проектирования конструкций, причем если раньше они использовались, как правило, на завершающих стадиях – уже после того, как спроектированная конструкция прошла все испытания, смоделированные на компьютере, – то теперь технологии оптимизации применяются еще при разработке концепта. Это позволяет при создании новых конструкций уйти не только от интуитивных методов работы инженеров, основанных на уже существующих решениях (например, спроектированных ранее конструкциях, прототипах), но и снизить затраты на изменения первоначального варианта, необходимость в которых выяснилась в ходе испытаний.

Рисунок 10. Два варианта использования оптимизации в процессе проектирования промышленной продукции



Источник: Инжиниринговый центр
«Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ по материалам [53]

Более того, технологии оптимизации и компьютерного моделирования фактически стали основой, а затем и локомотивом (драйвером) проектирования в промышленности, выражением чего служит парадигма (Simulation & Optimization)-Driven Design [подробнее о развитии этой парадигмы см. 3, с. 15–16]. Эта парадигма позволяет на основе наукоемкого компьютерного моделирования (компьютерного инжиниринга) и оптимизации в кратчайшие сроки разрабатывать продукты нового поколения с одновременным повышением их качества в соответствии с запросами рынка [26, с. 15–17].

В условиях глобализации и гиперконкуренции создание в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной и востребованной продукции нового поколения как стратегическая цель современной высокотехнологичной промышленности [3, с. 10] априори предполагает, что эта продукция будет оптимальной с точки зрения множества конфликтующих критериев (целевых функций в заданной области определения), то есть будет результатом многокритериальной оптимизации. При этом наилучших возможных вариантов (совокупности решений, которые не имеют преимуществ друг перед другом по всем критериям – так называемое множество Парето) может быть достаточно много, сами критерии могут относиться к различным дисциплинам (мультидисциплинарная оптимизация) и иметь настолько сложную зависимость от огромного числа переменных (многопараметрическая оптимизация), что единственным путем получения оптимального результата являются современные численные методы оптимизации, реализованные в специализированных программных системах оптимизации – CAO-системах.

Рисунок 11. Множество Парето



Источник: [24]

Характерной особенностью конструкций, которые получаются в результате оптимизации, являются, как правило, сложные и сверхсложные геометрические формы, которые лежат «за гранью интуиции генерального конструктора». Поэтому на протяжении последних 20–25 лет инженеры-расчетчики, которые уже применяли методы оптимизации и получали оптимальные решения, слышали в ответ: «такие оптимизированные детали и конструкции изготовить невозможно», «этого не позволяют сделать даже современные многофункциональные фрезерные обрабатывающие центры с многоосевыми станками с числовым программным управлением (ЧПУ)». Стремительное развитие аддитивных технологий и аддитивного производства позволяет снять эти производственные ограничения и практически полностью использовать потенциал технологий оптимизации. По сути, конвергенция и синергия двух глобальных трендов (стремительного развития компьютерного инжиниринга, включая технологии оптимизации, и аддитивных технологий) дают возможность говорить о принципиально новом подходе к проектированию и созданию «best-in-class» оптимизированных конструкций – бионическом дизайне – (Simulation & Optimization)-Driven Bionic Design.

Опыт сотрудников Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ позволяет утверждать, что бионический дизайн – это проектирование и производство глобально конкурентоспособной и кастомизированной / персонализированной продукции нового поколения на основе применения технологий компьютерного инжиниринга, оптимизации (многопараметрической, топологической, многокритериальной, мультидисциплинарной и др.) и передовых производственных технологий, в первую очередь аддитивных технологий, когда получаемые оптимальные «best-in-class» инженерные решения (детали, изделия, конструкции и т. д.) напоминают структуры, встречающиеся в живой природе.

Бионический дизайн есть неотъемлемая часть передовых производственных технологий (ППТ). Наиболее близкий англоязычный термин, правильно передающий смысл ППТ, – Advanced Manufacturing Technology (АМТ). Итак, определим ППТ как сложный комплекс мультидисциплинарных знаний и системы ноу-хау, полученных с помощью длительных и дорогостоящих научных исследований, эффективного применения концепции открытых инноваций и трансфера передовых наукоемких технологий. Принципиально важно подчеркнуть, что многие наукоемкие технологии аккумулируют наработки нескольких лет, создаются большими коллективами, а потому трудоемкость их создания составляет тысячи и десятки тысяч человеко-лет.

Для Российской Федерации передовые производственные технологии – это современная версия промышленной политики, направленная на создание в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной и кастомизированной продукции нового поколения, на импортозамещение и импортоопережение высокотехнологичной зарубежной продукции, на увеличение доли экспорта отечественных высокотехнологичных продукции и услуг («экспортно-ориентированное импортоопережение»).

Учитывая вышесказанное, можно привести символическую формулу передовых производственных технологий (в первом приближении):

ППТ⁽¹⁾ = передовые материалы & цифровое моделирование и проектирование, включая бионический дизайн, суперкомпьютерный инжиниринг и оптимизация & аддитивные и гибридные технологии.

Естественно, за ППТ⁽¹⁾ последуют уточнения и дополнения: ППТ⁽²⁾, ППТ⁽³⁾,... , связанные в первую очередь с формированием Digital / Smart / Virtual Factory, созданием высокотехнологичной продукции нового поколения и формированием новых рынков высококастомизированной продукции.

1 Бионический дизайн, топологическая оптимизация и аддитивные технологии

1.1 Методы топологической оптимизации: значение бионических принципов

К настоящему времени сформировалось множество методов (алгоритмов) топологической оптимизации, которые широко используются в инженерном деле. Их можно разделить на две группы – интуитивные (эвристические) и математического программирования.

Первые основаны на критериях оптимальности и состоят, как правило, из двух этапов: сначала задается целевая функция и определяются необходимые требования, которым должна удовлетворять оптимальная конструкция, а затем осуществляется многократное (итерационное, повторяющееся) внесение изменений в промежуточные варианты до тех пор, пока итоговый дизайн не станет оптимальным (типичный пример – алгоритм отыскания равнопрочной конструкции, применяемый в авиации [см., например, 54]). При этом критерии оптимальности могут выводиться как из математической формулировки задачи, так и основываться на особенностях поведения, отмеченных для некоторых классов конструкций.

При математическом программировании задача нахождения оптимального дизайна сводится к нахождению экстремума целевой функции в многомерном пространстве переменных проектирования, ограниченном геометрическими и технологическими характеристиками, физико-механическими свойствами материалов и эксплуатационными характеристиками [50, р. 2–3].

Ряд интуитивных алгоритмов представляет особый интерес, поскольку их применение на самых ранних стадиях проектирования еще при подготовке концепта существенно облегчает дальнейшую работу: получаемый в результате дизайн близок к оптимальному и может в этом смысле служить стартовой площадкой для более эффективного использования методов математического программирования (из-за существенно меньшего числа переменных, конечных элементов и требуемых расчетов целевой функции значительно экономятся финансовые средства и время, снижаются требования к вычислительной мощности компьютеров) [50, р. 72, 172].

Важнейшую роль в этой связи играют алгоритмы, построенные на моделировании процессов в живой природе, в частности, на процессе роста деревьев (adaptive growth) [подробнее см. 55] и так называемом законе Вольфа², описывающем поведение костной ткани человека и прочих позвоночных организмов под влиянием каких-либо факторов (чаще всего нагрузок). В настоящее время принята следующая формулировка закона Вольфа: кость приспосабливает свою внешнюю форму и внутреннюю структуру к тем механическим силам, которые она должна выдержать [цит. по 56, с. 71].

Наряду с этим в современной анатомии приняты следующие принципы организации кости, близкие по смыслу к закону Вольфа:

1. Костная ткань образуется в местах наибольшего сжатия или натяжения.
2. Степень развития костей пропорциональна интенсивности деятельности связанных с ними мышц.

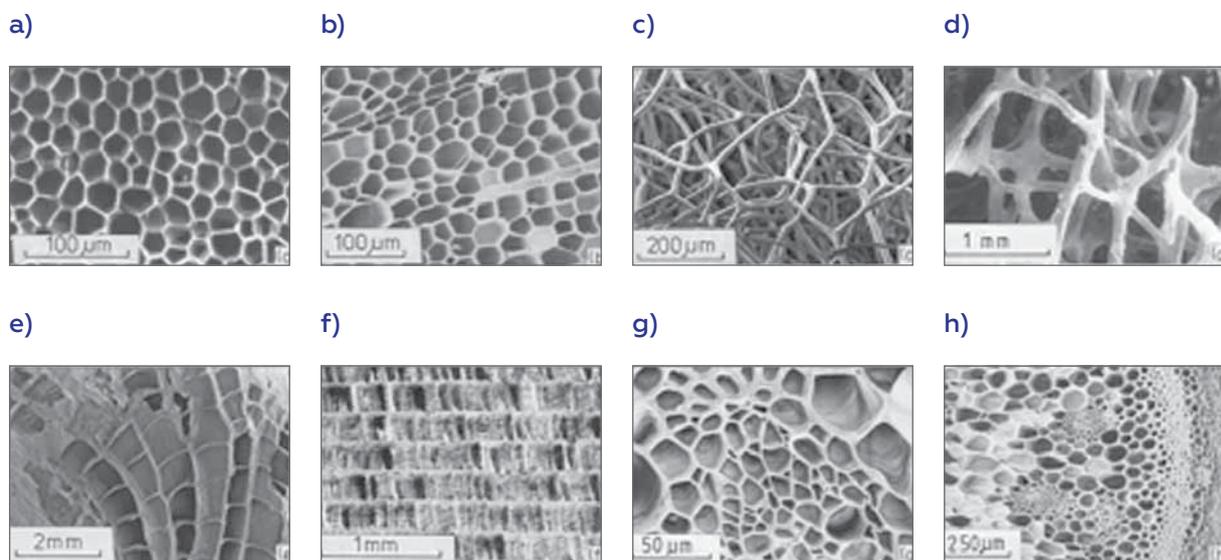
² По имени немецкого анатомиста и хирурга Юлиуса Вольфа (1836–1902), которому по традиции приписывают соответствующие мысли.

3. Трубчатое и арочное строение кости обеспечивает наибольшую прочность при минимальной затрате костного материала.
4. Внешняя форма костей зависит от давления на них окружающих тканей и органов, в первую очередь мышц, и меняется при уменьшении или увеличении давления.
5. Перестройка формы кости происходит под влиянием внешних для кости сил [56].

В топологической оптимизации из разработанных на теоретическом уровне алгоритмов, построенных на законе Вольфа, практическое внедрение получили математические модели Soft Kill Option и Hard Kill Option. Идея заключается в том, что элементы конструкции, находящиеся под небольшой нагрузкой, за несколько итераций в первом случае утончаются (Soft Kill), а во втором – убираются вовсе (Hard Kill), позволяя тем самым оставить материал лишь там, где он необходим для выполнения функциональных требований [50, p. 180].

В результате внедрения этих двух математических моделей в специализированное программное обеспечение по оптимизации в начале 1990-х гг. [57; 58] на макроуровне (то есть на уровне отдельно взятой конструкции в целом) инженеры получают геометрические решения, по своему внешнему виду отдаленно напоминающие полые структуры (hollow structures), которые на молекулярном уровне лежат в основе тканей живых организмов (человека, животных, растений), например, в древесине, пробке, костной ткани, паренхиме растений и губках (*Porifera*).

Рисунок 12. Пример полых структур в живой природе: пробка (а), бальза (b), губка (c), трабекулярная костная ткань (d), коралл (e), кость каракатицы (f), ткань листа ириса (g), стебель растения (h)



Источник: [59, p. 22]

Характерной особенностью полых структур в природе является сочетание небольшого веса (обеспечивается низкой плотностью) с высокими механическими свойствами (способностью нести большие нагрузки). Так, бальза по отношению жесткости к весу по направлению осевой нагрузки сравнима со сталью [60, p. 1374].

1.2 Топологическая оптимизация в сочетании с традиционными и аддитивными методами производства

Сегодня в повседневной инженерной практике на уровне отдельно взятых конструкций сходное сочетание показателей достигается при использовании Soft Kill и Hard Kill Option, внедренных в виде отдельных методов³ в некоторые из современных программных систем по оптимизации – OptiStruct и solidThinking Inspire компаний Altair и solidThinking (США), Tosca Structure и Tosca Fluid компании Dassault Systèmes (Франция), Optimus компании Noesis Solutions (Бельгия), IOSO NM компании «Сигма Технологии» (Россия), modeFrontier компании ESTECO (Италия). Хотя производители программного обеспечения предпочитают не раскрывать точные данные относительно используемых алгоритмов, анализ доступной литературы показывает, что как минимум в OptiStruct, solidThinking Inspire и Tosca внедрены доработанные и усовершенствованные методы ESO / BESO / XESO.

Вставка 1. Программная система Tosca Structure

Общая характеристика:	
Непараметрическая оптимизация на основе пакетов конечно-элементного анализа Abaqus, ANSYS, MSC Nastran. Включает возможности топологической оптимизации, оптимизации размеров и формы, топографической оптимизации (bead optimization)	
Примеры использования в промышленности:	
<p>Компания-заказчик: Suzlon GmbH Деталь: силовой каркас (платформа) энергоустановки Тип оптимизации: топологическая Главный критерий: жесткость, прочность, вибрация, производственный процесс (литье) Результат: сокращение веса детали на 40%</p>	<p>Компания-заказчик: BMW Group Деталь: кулак задней подвески Тип оптимизации: оптимизация формы Главный критерий: прочность, износ, деформируемость, жесткость Результат: сокращение полумок детали на 60%</p>
<p>Компания-заказчик: Tenneco Деталь: глушитель автомобиля Тип оптимизации: топографическая Главный критерий: жесткость, вибрация, производственный процесс Результат: первая частота собственных колебаний возросла с 208 до 520 герц, вторая – с 340 до 570 герц; достигнуто аналогичное снижение шума</p>	<p>Компания-заказчик: н. д. Деталь: кузов без покраски и грунтовки Тип оптимизации: оптимизация размера Главный критерий: вес, динамические характеристики, жесткость Результат: сокращение веса на 15% с 329 до 280 килограммов</p>
Доступные графические интерфейсы:	
Оптимизационный модуль в Abaqus / CAE	Среда Tosca ANSA
Расширение Tosca для ANSYS Workbench	ANSA
Tosca Structure.gui (пользовательский интерфейс Tosca)	

³ ESO (Evolutionary Structural Optimization), BESO (Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization) и XESO (Extended Evolutionary Structural Optimization).

Вставка 2. Программная система Tosca Fluid

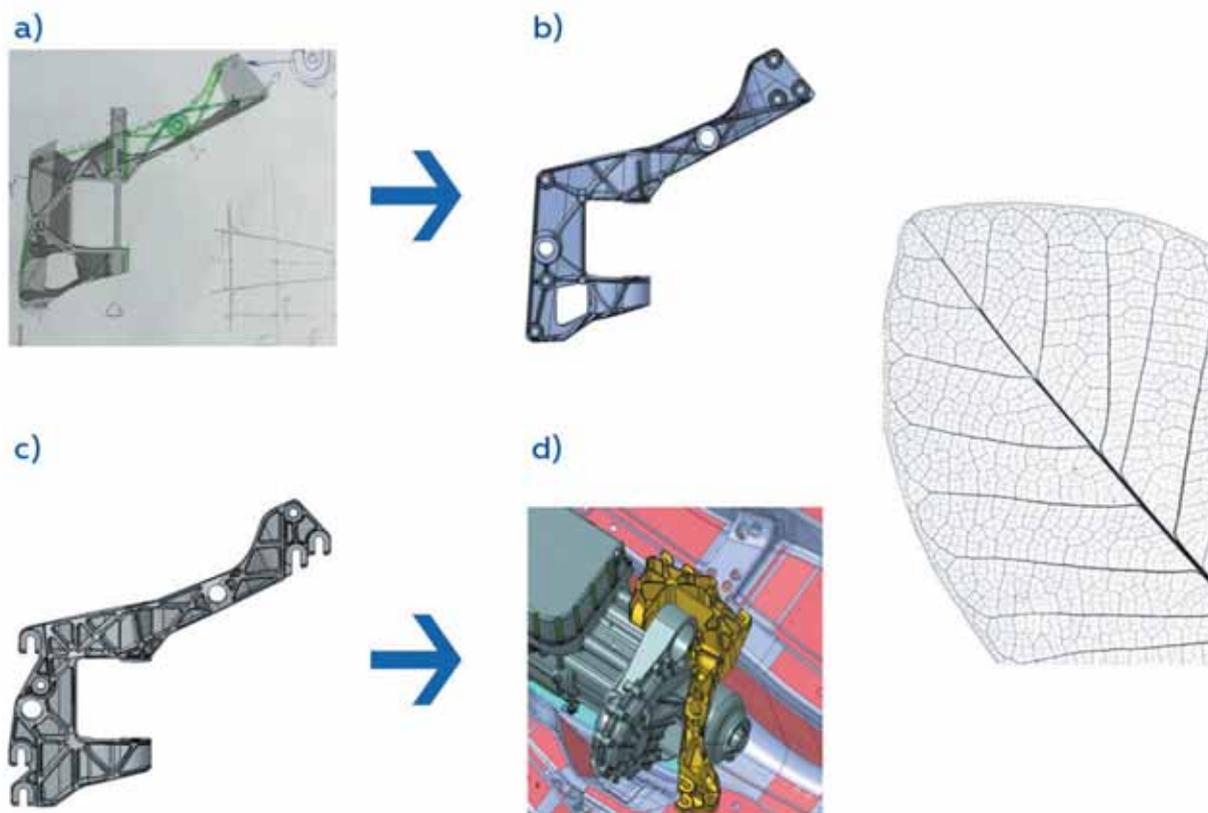
Общая характеристика:	
<p>Непараметрическая гидроаэродинамическая оптимизация на основе стандартных пакетов конечно-элементного анализа. Концептуальный дизайн и топологическая оптимизация гидроаэродинамических устройств и конструкций с уменьшенными перепадами давления и улучшенной однородностью потока</p>	
Примеры использования в промышленности:	
<p><i>Компания-заказчик:</i> н. д. <i>Деталь:</i> дефлектор обдува в салоне автомобиля <i>Результат:</i> снижение перепадов давления на 50%, равное распределение потока воздуха между водителем и пассажиром</p>	<p><i>Компания-заказчик:</i> Albonair GmbH <i>Деталь:</i> двухпоточный катализатор окисления дизельного топлива (DOC) <i>Результат:</i> снижение перепадов давления на 65%, равное распределение потока выхлопных газов</p>
<p><i>Компания-заказчик:</i> Adam Opel AG <i>Деталь:</i> рукав для системы охлаждения двигателя <i>Результат:</i> сокращение зон рециркуляции и обратных потоков, снижение перепадов давления на 20%</p>	

Вставка 3. Программная система solidThinking Inspire

Общая характеристика:	
<p>Технология для создания концептуальных дизайнов изделий и топологической оптимизации конструкций. Предназначена в первую очередь для конструкторов на ранних стадиях проектирования, поскольку на достаточно простом уровне понимания дает широкие возможности по оценке прочности, жесткости и долговечности разрабатываемого дизайна. При этом система включает в себя технологию многопараметрической топологической оптимизации HyperWorks OptiStruct. Дизайн изделия, созданный в Inspire, может быть конвертирован в формат, удобный для передачи непосредственно на 3D-принтеры</p>	
Алгоритм решения задач топологической оптимизации в solidThinking Inspire 2014:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Выделение / импорт части конструкции (детали) 2. Упрощение детали («убирание лишних деталей», привнесенных интуицией конструктора) 3. Задание характеристик материалов и граничных условий (закреплений или внешних нагрузок) 	<ol style="list-style-type: none"> 4. Выбор целевой функции в задаче оптимизации (например, максимизация жесткости, минимизация веса и др.), задание ограничений (например, по толщине и / или по собственным частотам); решение оптимизационной задачи и получение первого варианта оптимальной конструкции 5. Конечно-элементный расчет первого варианта оптимальной конструкции, анализ и интерпретация КЭ-результатов 6. Экспорт финальной оптимальной конструкции и «улучшение» конструкции в CAD-системе

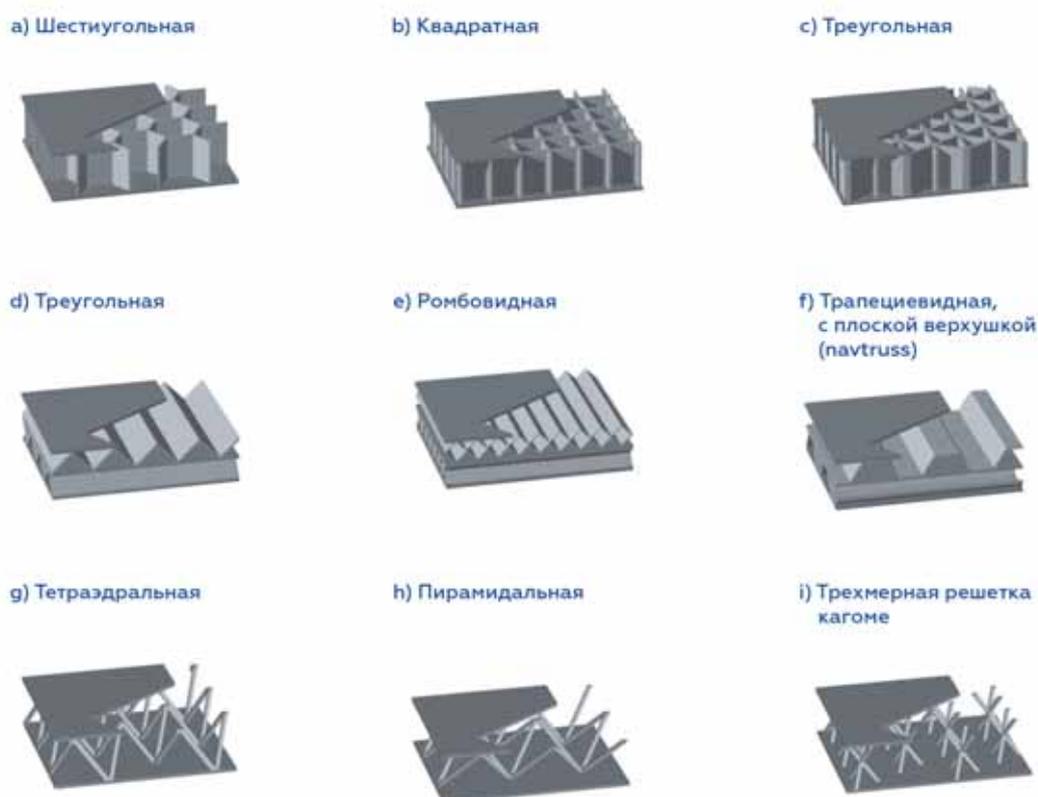
Методы ESO / BESO / XESO эффективно применяются в различных отраслях промышленности еще на стадии создания концептуального дизайна. Наиболее характерной является ситуация в автомобилестроении, где значительное число деталей легковых машин проектируется следующим образом: инженерам известно первоначальное компоновочное пространство, известны нагрузки и производственные процессы, которые будут задействованы при изготовлении. Исходя из этих параметров, программа оптимизации выдает вариант конструкции, который напоминает структуры живой природы. Например, в рамках проекта по созданию отечественного автомобиля премиум-класса в Центре компьютерного инжиниринга СПбПУ Петра Великого была оптимизирована опора раздаточной коробки передач двигателя, ребра которой (несут силовую нагрузку) оказались схожи с прожилками (скелетом) листа дерева, а вся оптимизированная деталь – на 60% легче по сравнению с традиционно используемыми дизайнами. Следует отметить, что с инженерной точки зрения геометрия опоры не является очевидной (лежит за «гранью интуиции» конструкторов) – не повторяет и не моделирует существующие варианты конструкции, то есть разработана «с нуля», но отвечает всем функциональным требованиям и максимально учитывает способы производства, которые будут применены на этапе сборки автомобилей.

Рисунок 14. Пример топологической оптимизации опоры раздаточной коробки передач автомобиля



Наряду с отдельно взятыми конструкциями в промышленности более или менее успешно налажено использование полых структур включая и микроуровень – например, микропористые структуры. Здесь выделяют два типа полых структур – стохастические (отличаются случайной формой, размером и распределением пустот) и упорядоченные / регулярные (характеризуются наличием периодических ячеек или повторяющейся топологией структуры). К первым относят пористые металлы, металлическую пену, губки и полую сферическую пену (hollow sphere foam), а ко вторым – различные решетчатые структуры (lattice), которые чаще всего подразделяют на сотовые (honeycomb), призматические или гофрированные (prismatic, corrugated) и ферменные (truss) [65].

Рисунок 15. Примеры форм решетчатых структур, используемых в промышленности: сотовые (a, b, c), призматические (d, e, f), ферменные (g, h, i)



Источник: Инжиниринговый центр
«Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ по материалам [66, р. 987]

Вместе с тем, несмотря на выгодное сочетание разных свойств (малый вес, высокая прочность и термостойкость, большая удельная поверхность и эластичность, низкая плотность), которые демонстрируют стохастические и упорядоченные структуры, принципиально важно понимать, что их производство субтрактивными методами чрезвычайно ограничено. Существующие способы – спекание порошков, литье по полимерным моделям, прямое и не прямое пенообразование (процессы Hydro / Alcan / Combal, Alporas, Casar / Lotus, Alulight / Foaminal, Formgrip) [67, р. 39], диффузионная сварка, гофрирование, штамповка, гибка, литье в песчаные формы и др. – обладают целым рядом существенных недостатков:

1. Традиционные методы производства не позволяют сочетать макро- и мезоструктуры, то есть ячейки различных размеров и топологий.
2. В ряде случаев отдельные производственные процессы (различные виды литья) оказываются слишком затратными в финансовом отношении, а качество конечного продукта недостаточного уровня (большая пористость, низкая жесткость).
3. Применительно к стохастическим полым структурам невозможно обеспечить предсказуемые и повторяемые результаты по размеру, морфологии и распределению пустот.
4. По упорядоченным полым структурам существующие производственные процессы ограничивают инженеров, поскольку они вынуждены иметь дело лишь с заранее predetermined мезоструктурой, материалами и макроструктурой, в результате чего невозможно создать дизайн, максимально адекватный нескольким целям [68].

В этом смысле изготовление полых структур с помощью аддитивных технологий представляет собой реальную альтернативу традиционным методам производства.

Аддитивные технологии – это набор перспективных технологий кастомизированного производства деталей сложной формы по трехмерной компьютерной модели (3D CAD-модели) путем последовательного нанесения («добавления») материала в противоположность «вычитанию» материала из массива заготовки (классический пример – механическая обработка металлов: фрезерование, сверление, токарная обработка и т. д.) [69].

Говоря о полых структурах, можно выделить два главных преимущества аддитивных технологий.

Во-первых, на макроуровне они дают беспрецедентные возможности по производству конструкций со сложной и сверхсложной контурной геометрией и топологией, которые невозможно изготовить традиционными методами. Кроме того, если изначально технологии 3D-печати были ориентированы на создание прототипов для тестирования в основном из пластиков, то сегодня речь идет о полноценном производстве готовых продуктов, в том числе из металлов и даже композиционных материалов, а скорость и качество изготовления постоянно возрастают.

Так, в начале 2015 г. британская компания Rolls-Royce объявила о начале летных испытаний авиационного двигателя Trent XWB-97 для будущего пассажирского самолета Airbus A350-1000 с силой тяги 97 тыс. фунтов, в котором корпус передней опоры ротора диаметром 1,5 метра и толщиной стенок 50 сантиметров изготовлен аддитивными методами (технология электронно-лучевого сплавления шведской фирмы Arcam). В феврале 2014 г. компания MarkForged вывела на рынок первый в мире 3D-принтер, в котором в качестве материала для печати используется углеволокно. В марте 2015 г. американская компания Carbon3D объявила о выводе на рынок аддитивной технологии CLIP (Continuous Liquid Interface Production), которая позволяет в 25–100 раз ускорить процесс печати сложных объектов из полимеров по сравнению с конкурирующими методами (стереолитографией, селективным лазерным спеканием и Polyjet компании Stratasys) [70; 71; 72].

Таблица 2. Сравнительный анализ процессов производства полых структур

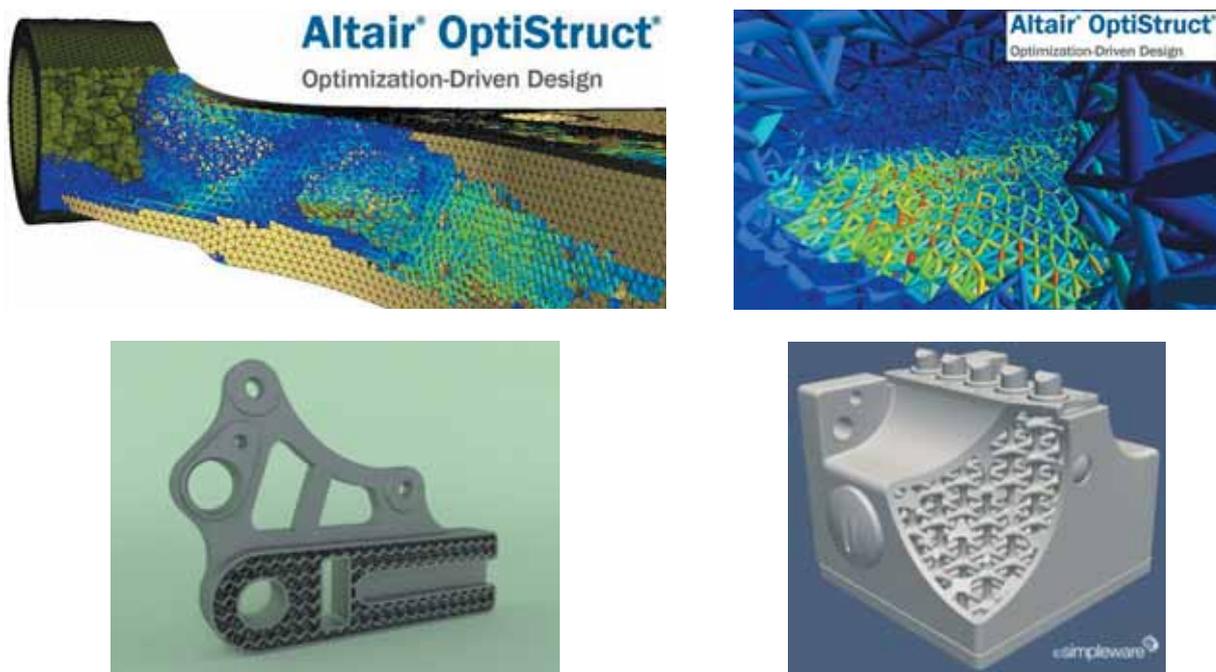
Структуры	Производственные процессы	Повторяемость производственного процесса	Отсутствие ограничений по материалам	Отсутствие ограничений на уровне мезоструктуры	Отсутствие ограничений на уровне макроструктуры
Стохастические	Металлические пены	Hydro / Alcan / Combal	<input checked="" type="checkbox"/>		
		Alporas			
		Gasar / Lotus			
		Alulight / Foaminal			<input checked="" type="checkbox"/>
		Formgrip			<input checked="" type="checkbox"/>
		Металлические губки			<input checked="" type="checkbox"/>
Регулярные		Полая сферическая пена	<input checked="" type="checkbox"/>		
		Сотовые структуры	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
		Ферменные структуры (Lattice Block Structures компании Jamcorp)	<input checked="" type="checkbox"/>		
Спроектированные		Аддитивное производство	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Источник: [68]

Во-вторых, аддитивные технологии не только позволяют перейти к производству стохастических структур (как было показано выше, отчасти это было возможно и раньше), но, самое главное, выступают в качестве драйвера обеспечения предсказуемых и повторяемых результатов по размеру, морфологии и распределению пустот за счет происходящего в настоящее время рывка в развитии оптимизации.

Этот рывок заключается в переходе технологий оптимизации с макро- на микроуровень, когда соответствующие программные системы позволяют эффективно соединять твердотельные структуры с переменными объемами полостей непосредственно внутри конструкций. Другими словами, если модели Soft Kill и Hard Kill Option позволяют получить «укрупненный» оптимальный дизайн, то новые методы дают возможность осуществить оптимизацию в деталях: например, программа OptiStruct компании Altair включает инструменты анализа напряженно-деформированного состояния полых структур, анализа на сжатие, сдвиг, изгиб, кручение, оценки их усталостных характеристик.

Рисунок 16. Примеры оптимизации полых структур в программных системах Altair OptiStruct (верхний ряд) и Simpleware ScanIP+CAD (нижний ряд)



Источник: [73; 74; 75]

По сравнению с конкурирующими технологиями, которые просто накладывают полые структуры на существующую геометрию, программная система OptiStruct позволяет дизайнеру определить наилучшее распределение материала и наиболее подходящие зоны для включения полых структур. Методы оптимизации позволяют понять, где в конструкции нужен материал, а где он не требуется, либо где однородный материал можно заменить на полые структуры.

OptiStruct проводит оптимизацию данных структур в два этапа. На первом этапе применяется стандартная топологическая оптимизация, позволяющая задать определенное количество пористого материала с усредненной плотностью. Затем зоны пористых структур преобразуются в явные полые структуры с различным объемом материала и пустот. На втором этапе оптимизируются размеры ячеек. В результате создается структура с твердотельными зонами в сочетании с зонами пористых и полых структур, в которых варьируется объем материала [73].

Большим подспорьем для аддитивного производства оптимизированных конструкций, в которых на микроуровне используются полые структуры, является совместная работа лидеров в технологиях оптимизации с компаниями – разработчиками программного обеспечения для 3D-принтеров. В частности, сотрудничество Altair и Materialise в рамках партнерского альянса позволяет обеспечить максимально эффективный импорт данных для трехмерной печати – минимизировать дефекты при передаче разработанной модели, соблюдая требования, предъявляемые к производству методом аддитивных технологий, в условиях когда полые структуры могут содержать сотни или тысячи ячеек, а традиционный экспорт STL-файла с моделью может стать серьезным препятствием в технологическом процессе.

Главная задача в промышленности, которую позволяет решить изготовление полых структур с помощью аддитивных технологий, – это снижение веса конечных изделий при сохранении нынешних или достижении даже более высоких показателей механических свойств. Для таких отраслей, как автомобилестроение и авиастроение, использование облегченных конструкций (lightweight structures) имеет критическое значение.

Например, ожидается, что с 2021 г. 100% новых легковых машин в Европейском союзе должны будут соответствовать более строгим требованиям по выбросам углекислого газа (нормы выхлопов CO₂ автомобилями с установленных сегодня 130 граммов на километр должны достигнуть 95 граммов). В связи с этим многие автопроизводители уже разработали планы по выпуску в ближайшие годы как минимум одной гибридной или электрической модификации во всех модельных линейках. При этом, чтобы снизить производственные риски и минимизировать затраты на опытно-конструкторские работы, крупные автоконцерны, как правило, либо применяют уже существующие решения для серийных моделей, либо используют проектирование на базе единой платформы, с возможностью интеграции электродвигателя (так называемый «модульный подход»). На начальных этапах разработки в конфигурации модульной платформы оставляется достаточно пространства, чтобы в дальнейшем можно было создавать различные версии электрических и гибридных авто. Такая унификация позволяет использовать одни и те же сборочные линии для моделей как с электромоторами, так и с двигателями внутреннего сгорания [76].

Несмотря на преимущества создания машин по модульному принципу (повышается оптимизация производства и снижаются затраты на опытно-конструкторские работы), такой подход не позволяет создавать принципиально новые, разработанные специально для электромобилей оптимальные по компоновке и массе конструкции кузова. В результате построенные на базе модульных платформ электромобили и гибриды на 20–30% тяжелее аналогичных моделей с двигателем внутреннего сгорания из-за добавленного веса аккумуляторных батарей и необходимости обеспечить дополнительную защиту батарейного отсека. Накладываемые же ограничения (по возможностям применения альтернативных материалов, таких как алюминий или углепластик) не позволяют компенсировать добавленный вес. Это означает, что в отсутствие явных прорывов в технологии производства аккумуляторных батарей задача по уменьшению веса машин становится всё более актуальной, а решаться должна за счет включения облегченных компонентов в модульные конструкции [76].

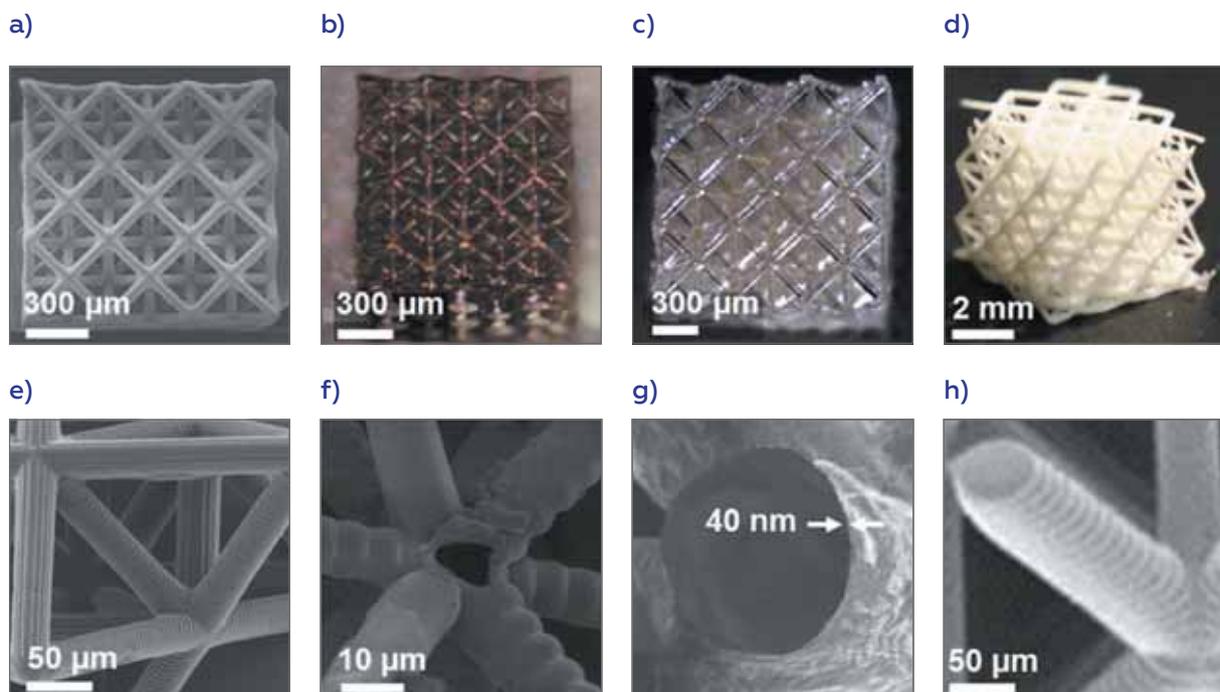
Схожая ситуация складывается в авиакосмической отрасли, где острая конкуренция на рынке, рост цен на топливо и ужесточение экологических стандартов требуют от производителей техники достижения стоимостной эффективности, причем в первую очередь за счет внедрения облегченных конструкций. Известно, что снижение веса самолета на 1 килограмм дает экономию около 350 долларов США на протяжении всего его жизненного цикла, а для увеличения полезной нагрузки космического аппарата на 1 килограмм требуется увеличение массы ракеты и ее топлива на 30–100 килограммов [77, р. 2; 78].

Из существующих прорывных технологических решений в области облегченных конструкций (lightweight structures) особого внимания заслуживают три:

1. В 2014 г. Ливерморская национальная лаборатория им. Эрнеста Лоуренса и Массачусетский технологический институт разработали технологию, позволяющую проектировать и производить микрорешетчатые структуры, которые получили название SuperLattice или «замерзший дым» (frozen smoke). По сути, речь идет о конструкции, по плотности близкой к аэрогелям или пеностеклу, но с жесткостью, как у монолитной резины, и способной нести нагрузку, которая в 160 тыс. раз превышает собственный вес [79]. При этом принципиально важно, что такое сочетание характеристик достигается не за счет химического состава вещества, а исключительно за счет геометрического расположения ячеек на микроуровне.

Основой для производства служит специально разработанный процесс проекционной микростереолитографии (projection microstereolithography): сначала из полимеров диакрилата 1,6-гександиола или диакрилата полиэтиленгликоля создаются шаблоны проектируемых стохастических микрорешетчатых структур, которые затем покрываются тонким слоем металла (никель-фосфорный сплав) толщиной 200–500 нанометров или керамики (оксид алюминия Al_2O_3) толщиной 50 нанометров. После этого полимерные шаблоны в результате термообработки убираются, а остающиеся ячейки демонстрируют беспрецедентные механические свойства – их жесткость примерно в 100 раз превышает жесткость прочих сверхлегких материалов, информация о которых нашла отражение в научной литературе [80].

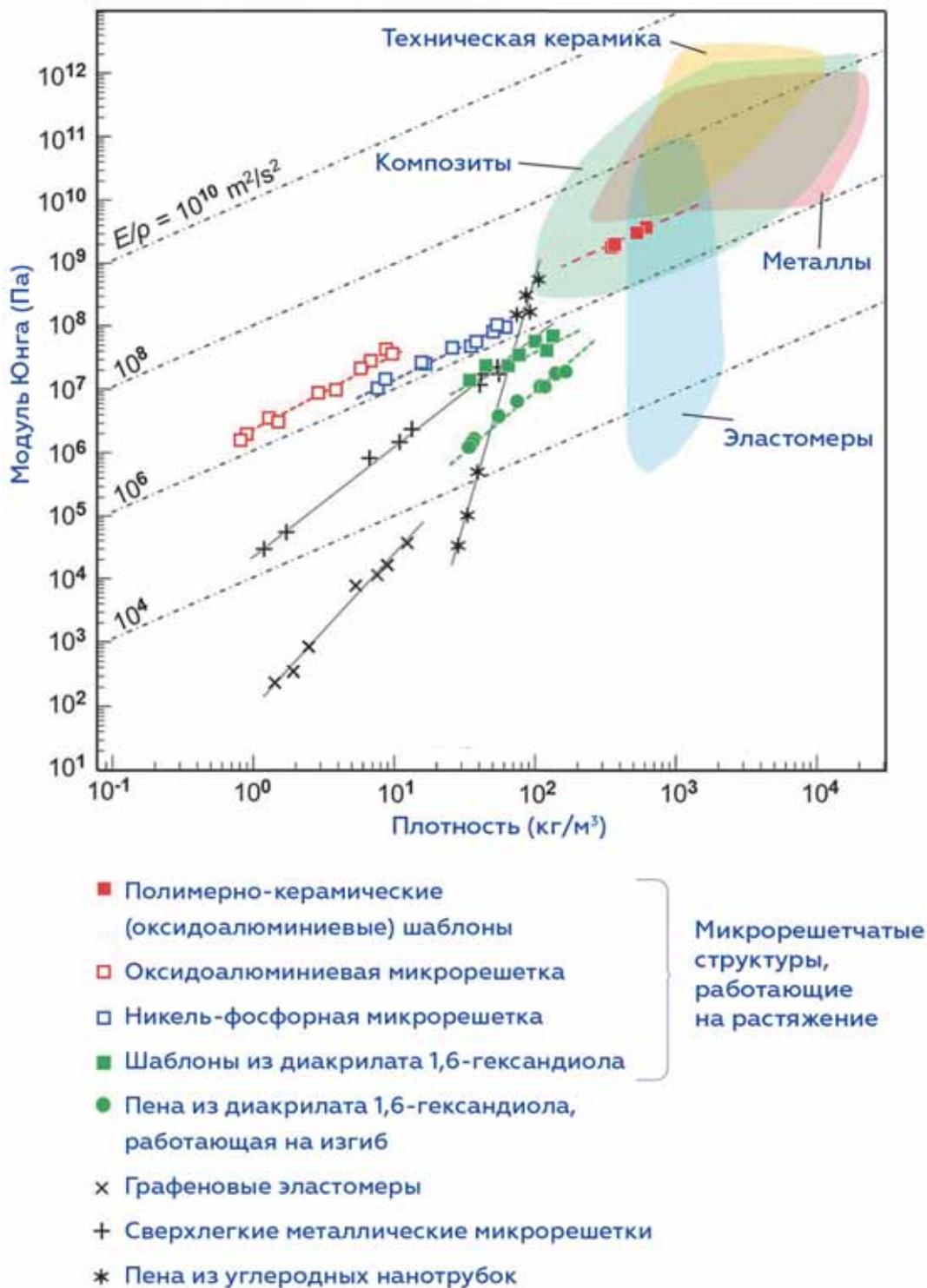
Рисунок 17. Образцы микрорешетчатых структур, разработанных инженерами Ливерморской национальной лаборатории им. Эрнеста Лоуренса и Массачусетского технологического института: полимерные шаблоны (а, е); никель-фосфорная микрорешетка, работающая на растяжение (b, f); оксидоалюминиевая микрорешетка, работающая на растяжение и изготовленная методом атомно-слоевого осаждения (с, g); оксидоалюминиевая микрорешетка, работающая на растяжение и изготовленная гибридным методом⁴ (d, h)



Источник: [60, p. 1375–1376]

⁴ Гибридный метод заключается в добавлении в диакрилат полиэтиленгликоля алюминиевых частиц размером около 150 нанометров. Получаемые в итоге полимерно-керамические шаблоны микрорешетчатых структур затем преобразовываются в каркасы из оксида алюминия путем спекания.

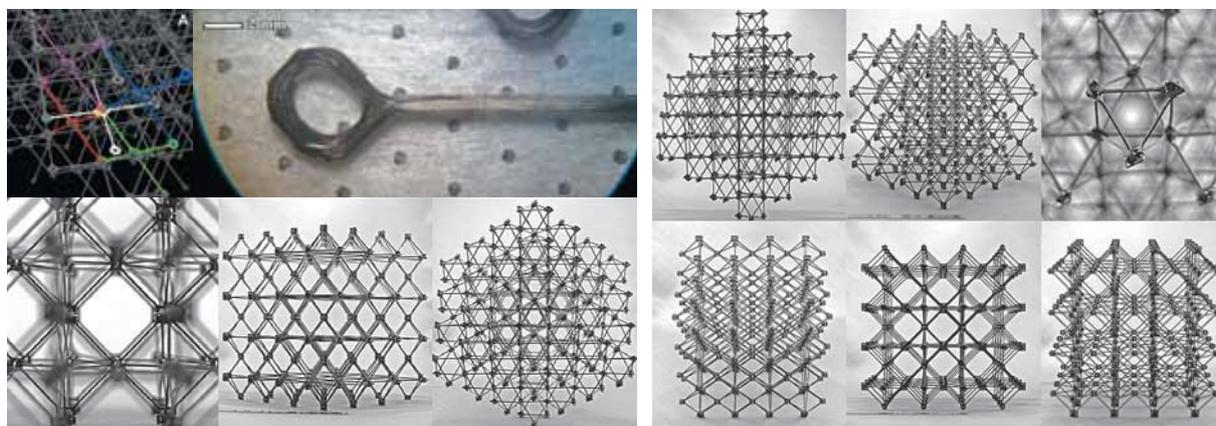
Рисунок 19. Механические свойства микрорешетчатых структур, разработанных инженерами Ливерморской национальной лаборатории им. Эрнеста Лоуренса и Массачусетского технологического института, в сравнении с металлами, композитами, керамическими материалами и другими сверхлегкими материалами, информация о которых нашла отражение в научной литературе, – графеновыми эластомерами, сверхлегкими металлическими микрорешетками и пеной из углеродных нанотрубок



Источник: Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ по материалам [60, р. 1376]

- В 2013 г. Массачусетский технологический институт разработал облегченные конструкции из армированных волокнами полимеров, которые реагируют на нагрузки как упругое твердое тело с высокими показателями модуля Юнга и плотности (12 мегапаскалей и 7,2 миллиграмма на кубический сантиметр соответственно). Такие показатели достигаются за счет соединения на микроуровне композиционных каркасов в кубические решетки, состоящие из ячеек в виде правильных восьмигранников (получили название *suboct*) и напоминающие кристаллическую структуру перовскита – минерала, который является основой нижней мантии Земли [81, р. 1219–1220]. Другими словами, основой производственного процесса является не собственно 3D-печать, а скорее «сборка ансамбля» («ансамблирование»). Для этого используется специальный робот, который подобно насекомому «ползет» над собираемой поверхностью.

Рисунок 20. Композитные микрорешетчатые структуры *suboct*, разработанные инженерами Массачусетского технологического института



Источник: [82; 81, р. 1219]

Такой подход позволяет уйти от двух недостатков, характерных для ныне используемых композитных структур. С одной стороны, их становится легче ремонтировать в случае повреждений, поскольку требуется замена лишь нескольких блоков: это особенно важно в свете того, что при расчетных воздействиях обычным композиционным материалам свойственно разрушаться внезапно и полностью. С другой стороны, специфика производства крупных деталей из композитов требует от компаний значительных вложений в оборудование, материалы и площади; предложенная американскими инженерами технология позволяет серьезно демократизировать, удешевить и сделать гибкими эти процессы, а также перейти к изготовлению крупных облегченных объектов, таких как ракеты, фюзеляжи самолетов, мосты, дамбы и т. д. [83]

- Институт лазерных и системных технологий Гамбургского технического университета (TUHH) и Северный лазерный центр (Laser Zentrum Nord) ведут активные прикладные исследования по вопросу создания облегченных структур для авиакосмической отрасли на основе титанового сплава TiAl6V4. Для этого одновременно используются программные системы топологической оптимизации компании Altair и метод лазерного аддитивного производства (Laser Additive Manufacturing, также в литературе называемый Laser Cladding, Additive Layer Manufacturing и Generative Manufacturing) – группа различных технологий, которые объединяет идея послойного сплавления или спекания заранее сформированного слоя порошковых материалов на платформе 3D-принтера путем выборочной обработки лазером для производства металлических или пластиковых деталей.

Рисунок 21. Процесс лазерного аддитивного производства (LAM), используемый Гамбургским техническим университетом и Северным лазерным центром



Источник: Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ по материалам [84, р. 365]

В качестве производственной основы процесса LAM используются 3D-принтеры компаний – лидеров отрасли: SLM (Solution 250HL), EOS (M270xt и P390) и Concept Laser (M2 cusing⁵). Главным же новшеством Гамбургского технического университета и Северного лазерного центра является внедрение бионических принципов непосредственно в процесс проектирования и разработки облегченных конструкций, который в итоге имеет следующий вид.

На первом этапе определяются требования, которым должен удовлетворять дизайн детали. По сути, это критерии оптимальности (целевые функции), например, минимум веса и ограничения на переменные проектирования: производственные ограничения, ограничения на физико-механические свойства материала, ограничения на нагрузки, ограничения по прочности, податливости или жесткости, частотам собственных колебаний, коэффициенту потери устойчивости и т. п. Затем проводится топологическая оптимизация, по итогам которой могут быть получены различные решения (множество Парето). Выбор между ними происходит на следующей стадии – интерпретации результатов (переход от оптимизированных конструкций к облегченным). Именно здесь немецкие ученые внедрили бионическую базу данных, в которой собраны сведения о «решениях» живой природы, описанных в терминах формы и базовых нагрузок – на растяжение, сдвиг, кручение и изгиб. Эта база данных, а фактически база знаний, позволяет инженерам находить и в ряде случаев напрямую использовать более адекватные и оптимальные «бионические» решения. После этого полученная облегченная конструкция подвергается трехмерному перемоделированию в системах автоматизированного проектирования (CAD-системах), анализируется на предмет соответствия критериям оптимальности и в случае успеха – отправляется на печать [84, р. 367–368; 87].

⁵ Cusing (полное наименование LaserCUSING®) – запатентованная технология компании Laser Concept (от английского слова FUSING – наплавление, сплавление; вместо F в начале слова используется C как начальная буква в названии фирмы). Эта технология используется в авиа- и автомобилестроении при производстве кронштейнов для соединения внешней оболочки фюзеляжа с пассажирской кабиной, угловых штуцеров вспомогательной системы подачи кислорода в многоцелевом истребителе Eurofighter Typhoon, рычагов разблокировки рулевых колонок, корпусов маслораспределителей и пр. Подробнее см. [85; 86].

Рисунок 22. Процесс проектирования и оптимизации бионических облегченных конструкций, разработанный в Гамбургском техническом университете и Северном лазерном центре



Источник: Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ по материалам [84, р. 366]

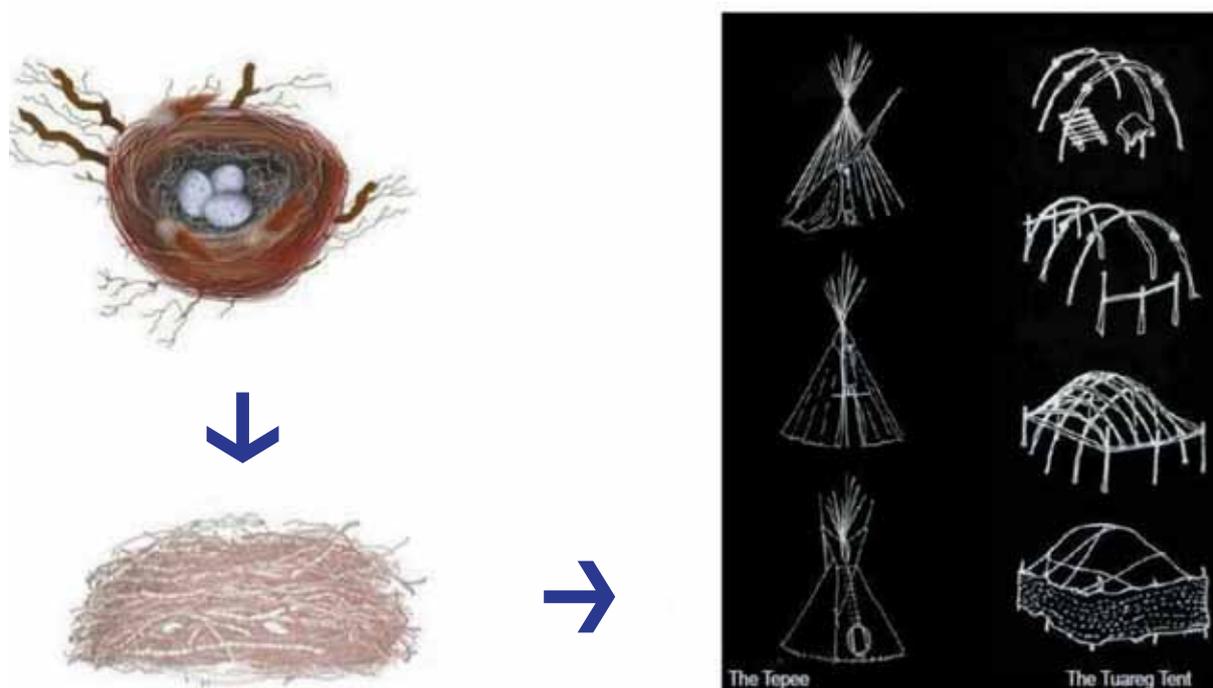
Таким образом, ключевое значение в создании глобально конкурентоспособной и востребованной продукции нового поколения приобретает даже не то, какие 3D-принтеры или материалы используются – они, как показывает опыт консолидации различных отраслей и рынков, в конечном итоге будут в большей или меньшей степени иметь сравнимые характеристики и не давать ощутимого конкурентного преимущества, – а степень «интеллектуальной емкости» этой продукции, выражаемая, например, долей использования наукоемких технологий компьютерного инжиниринга и оптимизации.

Итак, в конкурентной борьбе победит тот, кто отправит на 3D-принтер печатать самое интеллектуально емкое изделие – оптимизированное и кастомизированное изделие, или, короче, – «best-in-class» изделие.

2 Бионические принципы в архитектуре и промышленном дизайне

Одной из сфер деятельности человека, в которой бионические принципы традиционно используются для выполнения какой-либо конкретной инженерной задачи, является архитектура. Использование данных принципов может затрагивать создание опорных конструкций, оптимизацию распределения нагрузок, освещение и энергообеспечение здания. При строительстве жилья люди издревле ориентировались на то, как это делают животные и птицы. Таковы были вигвамы или типи индейцев Северной Америки и жилища туарегов – племени, населяющего Сахару. Это были достаточно простые конструкции, заимствовавшие у природы только основные идеи [88].

Рисунок 23. Схема имитации живой природы при постройке типи и тентов

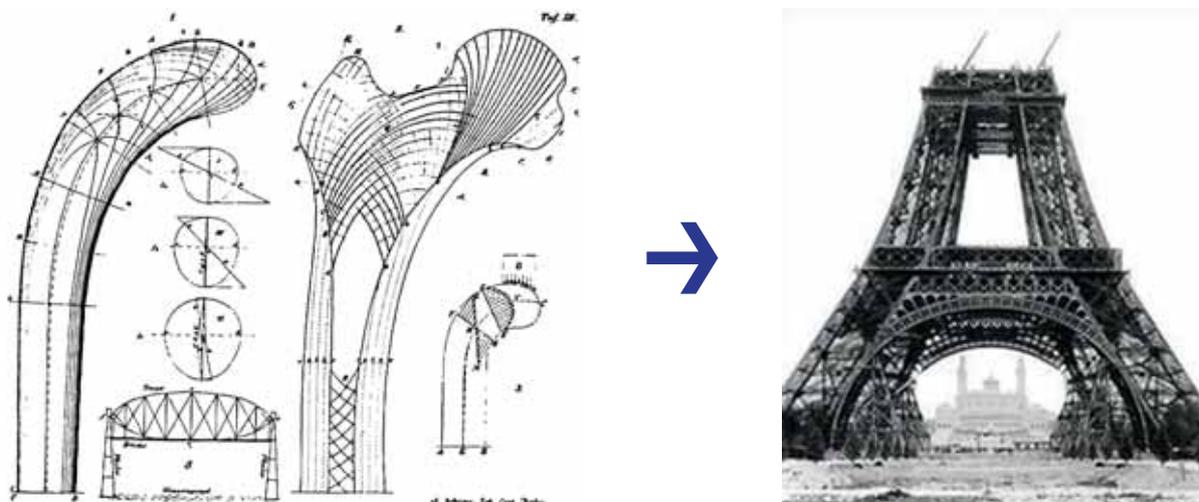


Источник: [88]

По мере становления архитектуры как отдельного направления, она приобретала всё более сложные формы. Строительство развивалось как отрасль, технологии совершенствовались, выбор материалов становился всё более богатым. Кроме того, увеличивалась высота строений, а это в свою очередь требовало создания достаточно прочных и при этом легких конструкций.

Пожалуй, один из самых известных примеров использования биомимикрии в архитектуре – Эйфелева башня, строительство которой было начато в 1887 г. Прототипом конструкции башни послужила бедренная кость человека. Расширение у основания башни имитирует строение верхней части бедренной кости, а внутренние перекрытия – костные трабекулы. Такое инженерное решение помогло решить сразу две проблемы – ветроустойчивость и вентиляцию.

Рисунок 24. Использование бионических принципов в архитектуре: слева – бедренная кость человека, справа – Эйфелева башня



Источник: [89]

Уже упоминавшийся архитектор Антонио Гауди в некоторых своих работах, по меткому выражению испанского художественного критика Даниэля Хиральт-Миракле (р. 1944), «...поставил технику на службу эстетике». Таковым может считаться здание приходской школы при храме Святого Семейства: конструкция крыши спроектирована наподобие листа магнолии, и ее необычная волнистая форма помимо несомненной эстетической привлекательности эффективно обеспечивает отвод воды [90].

Рисунок 25. Использование бионических принципов в архитектуре: слева – лист магнолии, справа – здание приходской школы при храме Святого Семейства



Источник: [91]

Несмотря на, казалось бы, достаточно длительную историю использования принципов функционирования живой природы в архитектуре, методология, в соответствии с которой осуществляется заимствование, еще до конца не сформирована. На сегодняшний день различают следующие уровни заимствования природных принципов в архитектуре [92]:

Таблица 3. Систематизация уровней применения бионических принципов

Тип заимствования	Уровни заимствования		
	Организм	Поведение	Экосистема
Форма	Здание похоже на живой организм	Здание похоже на природный объект, сделанный живым организмом	Здание похоже на экосистему, в которой живут живые организмы в природных условиях
Материал	Здание сделано из того же материала, что и живой организм	Здание сделано из того же материала, что и природный объект, возведенный живым организмом	Здание сделано из тех же материалов, что и экосистема, в которой существует живой организм или группа организмов
Конструкция	Здание имеет те же конструктивные особенности, что и живой организм	Здание сделано, так же как и природный объект, возведенный живым организмом	Здание сформировано из тех же элементов, что и экосистема
Процесс	Здание работает по тому же принципу, что и живой организм	Здание работает по принципу природного объекта, возведенного живым организмом	Здание работает по тому же принципу, что и экосистема
Функция	Здание наделено теми же функциями, что и живой организм	Здание функционирует, как и природный объект, возведенный живым организмом (в более широком контексте)	Здание функционирует как экосистема, является частью более крупной природной среды, в то же самое время представляет собой целостную самодостаточную структуру

Источник: [92]

Существует и альтернативное описание принципа заимствования функций живой природы в технике вообще и в архитектуре в частности, предложенное Джулианом Винсентом, директором Центра биомиметики и природных технологий в Батском университете (University of Bath). Согласно его концепции, техническое новшество должно быть равноудалено от биологии и техники (уровень «вдохновение от природы»), чтобы являться достаточно эффективным. Если предложенное решение слишком близко к инженерному, то это скорее оптимизация, и его уже нельзя отнести к биомимикрии; а если же, напротив, решение просто копирует природное (уровень полного или частичного имитирования), то оно может явиться недостаточно продуктивным [93]. Винсент полагает, что «биомимикрия не сводится к заимствованию и переносу природных механизмов в инженерные решения; люди должны разобраться в биологических механизмах, а затем заменить современный инженерный метод биологическим» [94].

Рисунок 26. «Карта биомиметики»



Источник: Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ по материалам [95, р. 54]

Как бы то ни было, в последние три десятилетия в мире наблюдается всё больше примеров использования бионических принципов при создании зданий:

1. Международный железнодорожный терминал Ватерлоо, введенный в эксплуатацию в 1993 г., который в свое время собрал множество архитектурных наград. Учитывая, что в терминал будут прибывать скоростные поезда, при движении которых образуется повышенное давление воздуха, крышу терминала предполагалось сделать подвижной. Она должна была иметь возможность расширяться вверх и в стороны, а затем возвращаться в прежнее состояние, снижая тем самым нагрузку. В качестве решения при проектировании конструкции стеклянного купола инженеры взяли за основу строение кожи ящера панголина, чешуйки которого весьма подвижны: ящер способен раскрывать и схлопывать их, когда это необходимо. Крыша терминала функционирует по сходному принципу: стеклянные панели закреплены только с одной стороны, что позволяет свободным краям двигаться под воздействием потоков воздуха, которые образуются, когда поезда прибывают и отходят от платформы [96].

Рисунок 27. Использование бионических принципов в архитектуре: слева – панголин, справа – крыша международного железнодорожного терминала Ватерлоо



Источник: [96; 97]

2. Национальный стадион Пекина, построенный к Олимпиаде 2008 г. Конструкция стадиона имитирует птичье гнездо, а пространство между перекрытиями заполнено прозрачными панелями из фторопласта-40 (ETFE). Такое инженерное решение позволило получить целый ряд преимуществ: это и защита зрителей от сильного ветра и дождя, и лучшая звукоизоляция, и меньшая стоимость эксплуатации, и меньший вес конструкции. Кроме того, обеспечивается фильтрация солнечных лучей.

Рисунок 28. Использование бионических принципов в архитектуре: слева – птичье гнездо, справа – Национальный стадион Пекина



Источник: [88]

3. Водный центр Пекина (более известен как Водный куб) – создан наподобие мыльных пузырей. Панели из фторопласта-40, того же материала, что использовался при постройке Национального стадиона, были сначала смоделированы на компьютере, а затем использованы в конструкции крыши и несущих стен. Панели изготовлены таким образом, чтобы пропускать солнечный свет и способствовать естественному нагреванию воды и терморегуляции внутри здания, тем самым позволяя уменьшить энергозатраты на обогрев. Кроме того, необходимое количество искусственного освещения снижается на 55% [98]. В темное время суток внутренний слой панелей препятствует рассеиванию тепла и помогает регулировать температуру.

Рисунок 29. Использование бионических принципов в архитектуре: слева – мыльные пузыри, справа – Водный центр Пекина



Источник: [98]

Наряду с уже реализованными проектами существует множество концептов зданий, так или иначе использующих принципы функционирования живой природы, причем как находящихся на стадиях реализации, так и футуристических. Наиболее известен проект Bionic Tower, разработанный дизайнерской студией LAVA (с 2007 г. проект находится на стадии технико-экономического обоснования). Идея концепта заключается в создании строения, которое бы органично вписывалось в окружающую экосистему и, подобно живому организму, реагировало бы на изменения внешних факторов, таких как атмосферное давление, температура, влажность, загрязненность воздуха и уровень солнечной радиации [99].

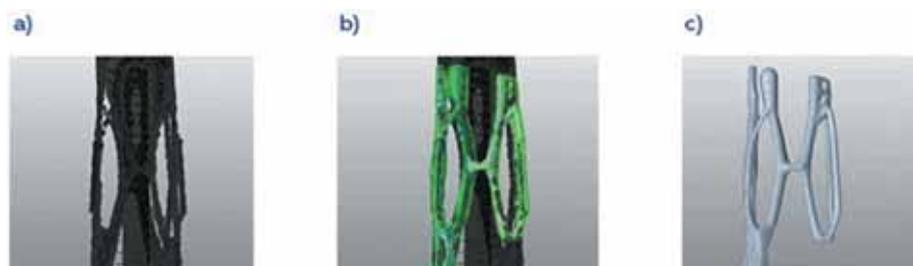
Рисунок 30. Концепция Bionic Tower



Источник: [99]

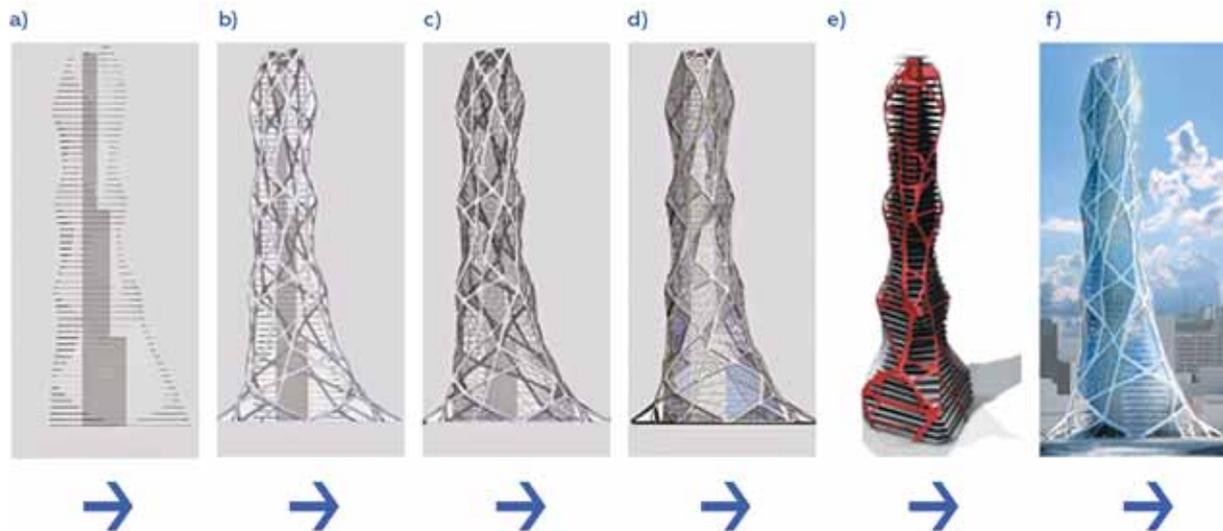
Проектирование столь сложной системы невозможно без применения самых современных компьютерных технологий, в том числе параметрического моделирования. При создании концепта архитекторы LAVA использовали CAD-систему Rhino. Далее 3D CAD-модель при помощи программного пакета solidThinking была преобразована в файл IGES, после чего для детального проектирования и расчетов строительной оболочки использовалась платформа HyperWorks (в частности, сеточный генератор HyperMesh). solidThinking также применялся для оптимизации конструкции с учетом действия ветровых нагрузок. Большое внимание уделялось топологической оптимизации, без которой невозможно было бы создать столь необычную конструкцию, которая не уступала бы по техническим характеристикам традиционной. С этой целью, в частности при оптимизации перфорированных стальных балок, использовалась CAE-система ANSYS для конечно-элементного моделирования [100].

Рисунок 31. Оптимизация перфорированных стальных балок Bionic Tower: результат применения функции OSS в HyperMesh для использования в качестве базы (a), моделирование поверхности на основе полученных результатов (b), окончательная версия конструкции (c)



Источник: [101]

Рисунок 32. Проектирование Bionic Tower: заготовка и ствол здания (a), экзоскелет (b), подконструкция (c), строительная оболочка (d), результаты топологической оптимизации наружной конструкции здания (e), окончательный концепт проекта (f)



Источник: [99; 100]

За счет топологической оптимизации можно достичь принципиально нового уровня в архитектуре. Всего несколько нажатий клавиш и программа превращает традиционную строительную оболочку в изящный экзоскелет, усиленный лишь там, где приходится наибольшая нагрузка. Весь лишний материал убирается, причем доступно несколько итераций оптимизации. Если проводить аналогии с природой, то строительный экзоскелет, получаемый в результате применения топологической оптимизации, очень схож по строению с животным, однако в отличие от своего природного аналога, который является результатом миллионов лет эволюции, создаваемый программой экзоскелет окончательно формируется за считанные минуты [102].

Футуристические концепты зданий подражают природе сразу по нескольким параметрам и являются практически самообеспечивающимися в плане электроэнергии и переработки отходов системами. К примеру, проект Treescraper Tower of Tomorrow предусматривает солнечные панели для выработки электроэнергии, особую водоочистную и отопительные системы, максимально использующие возможности природы, наличие зеленых насаждений, использование экологичных строительных материалов.

Команда Philips Design – создатели концепта Habitat 2020 – пошли еще дальше, предложив выполнить строительную оболочку здания, которая имитировала бы поверхность листа, перерабатывая солнечный свет в электроэнергию подобно процессу фотосинтеза и очищая бы дождевую воду для внутреннего пользования посредством специальных мембран, сходных по строению с устьицами листа. Однако осуществить подобные футуристические идеи на практике не так просто, поэтому на данный момент они остаются в большинстве своем лишь концептами.

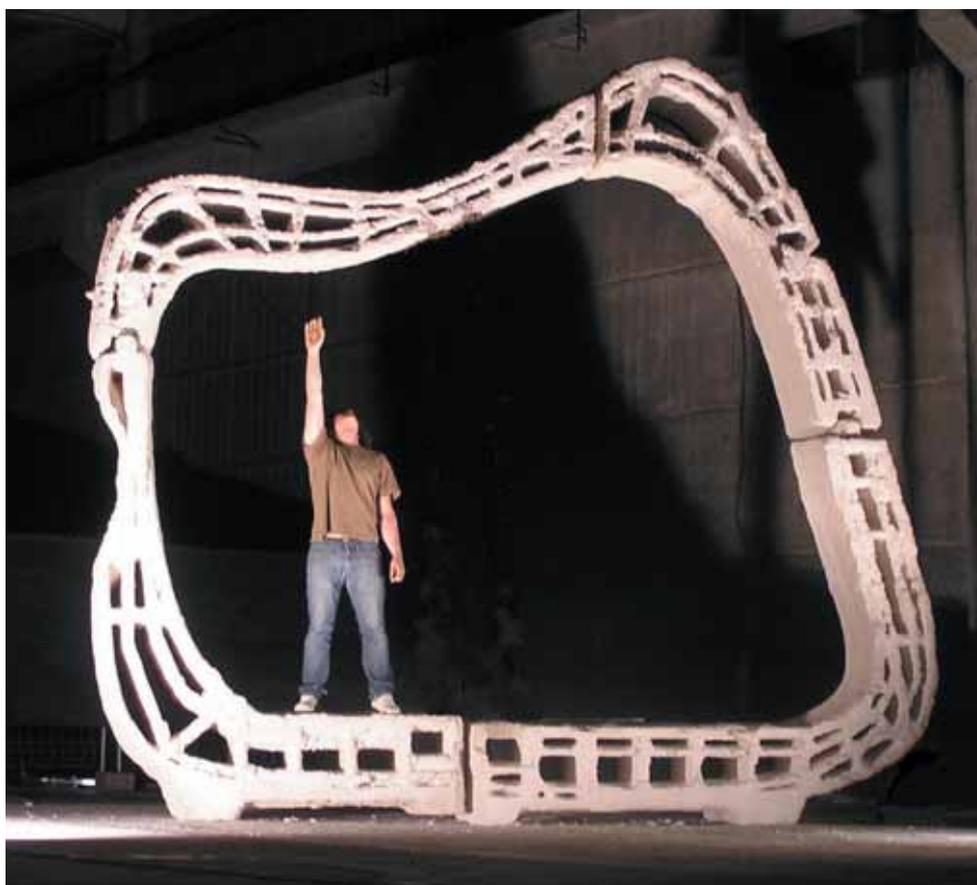
Рисунок 33. Концепты зданий, подражающие природе по нескольким параметрам: слева направо – концепт Treescraper Tower of Tomorrow, Habitat 2020, интерьер Habitat 2020



Источник: [103; 104; 105]

Наряду с топологической оптимизацией аддитивные технологии позволяют создавать конструкции, изготовление которых ранее было невозможным. Энрико Дини (р. 1962), инженер компании Monolite UK Ltd, разработал 3D-принтер D-Shape, предназначенный специально для строительства. Принтер имеет разрешение 25 DPI и способен печатать объекты с параметрами до 6,1×6,1×1 метра, используя стереолитографический процесс 3D-печати, для которого нужен лишь песок и специально разработанный неорганический связующий состав. Получаемый материал внешне неотличим от мрамора и имеет те же физические свойства, включая долговечность и прочность, значительно превосходя по качеству каменную кладку и железобетон. Принтер уже использовался при создании объектов в Пизе и Сардинии [106]. Используя данную технологию, архитектор получает возможность непосредственно создавать здания, без посредников, которые могут совершать ошибки в ходе реализации или неверной интерпретации. По расчетам разработчиков, текущая модель технологии D-Shape способна создать за год 2 500 квадратных метров, что эквивалентно двенадцати двухэтажным зданиям и в четыре раза быстрее, чем построение таких же структур традиционными средствами [107].

Рисунок 34. Архитектурные конструкции Monolite UK Ltd, изготовленные посредством 3D-печати



Возможно, в скором времени аддитивные технологии будут использоваться для создания не только отдельных деталей, но и целых зданий от начала до конца. Так, совместно с итальянским инженером-строителем Энрико Дини и еще одним американским коллегой Джеймсом Вольффом нью-йоркский архитектор Адам Кушнер создал компанию D-Shape Enterprises, использующую автоматизированные технологии строительства.

Кушнер планирует построить целое поместье, используя технику 3D-печати. Предполагается, что «3D-поместье» Кушнера будет состоять из дома, бассейна, небольшого домика у бассейна, ограды, гаража и нескольких навесов. Помимо крупных конструкций, Кушнер собирается «напечатать» и некоторые предметы мебели: сидения, столы, стойки, скамейки и др. Материалом должна послужить специальная смесь из кальцита, смеси соленой воды, песка и магния. Дом будет печататься блоками, соединяющимися при помощи гидрошпонки.

Если Кушнеру удастся построить таким образом хотя бы бассейн и домик у бассейна, это будет значить, что посредством 3D-печати возможно создавать подводные конструкции (такие как дамба) и небольшие строительные объекты (например, бомбоубежище) [109]. Партнер Адама Кушнера Энрико Дини предложил собирать с морского дна песок, печатать из него рифы и помещать обратно на дно. По мнению экспертов, это большой шаг к сохранению экологии прибрежной зоны, кроме того, это может помочь восстановить разрушенные кораллы [110].

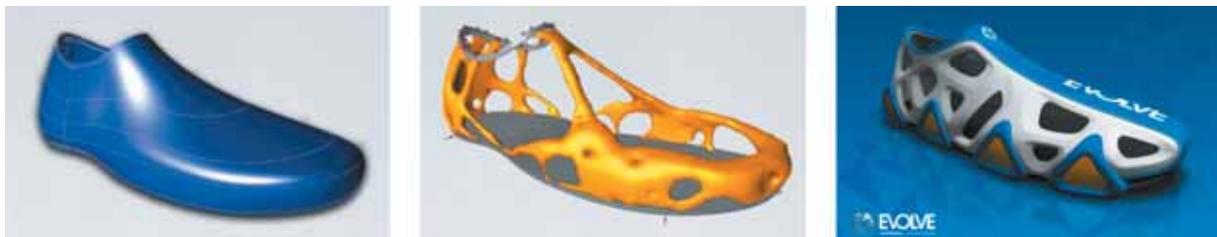
Изучение и применение форм и принципов природы имеет важное значение как с технической и инженерной стороны, так и с эстетической. Природные системы являются примером конструкций, которые гармонично функционируют на основе принципов обеспечения оптимальной надежности, создания оптимальной формы при экономии энергии и материалов. Закон минимума в живой природе обусловлен органической целесообразностью существования. Использование ее принципов способствует созданию функционально и эстетически полноценных объектов, конструкций и изделий для разных отраслей промышленности.

В условиях стремительного развития высокотехнологичных рынков важную роль в популярности и востребованности продукции начинает играть промышленный дизайн, в котором всё чаще используются бионические формы. Промышленный дизайн, как художественное и объемно-функциональное конструирование объектов для массового производства, возник в начале XX в. Он прошел несколько этапов, каждый из которых сопровождался изменениями в производстве и его организации, сложностью производимых продуктов, трансформацией эстетических идеалов. С появлением в 1990-х гг. и использованием в дизайне программного обеспечения для проектирования более сложных изделий, необычных нелинейных конструкций в архитектуре, процесс проектирования и визуализации продукта значительно ускорился. В 1990-е гг. в промышленном дизайне были распространены в основном «описательные модели» проектируемых объектов (3D-модели на базе относительно простых CAD), а в 2000-е стали применяться более сложные процессно-динамические модели, фиксирующие жизненный цикл проектируемых объектов (3D+ модели, созданные с помощью более сложных CAD-систем и CAE-систем, включающих технологии топологической оптимизации – CAO-системы). В последние десять лет стала проявляться тенденция постепенной интеграции промышленного дизайна в конструирование и инжиниринг. Теперь помимо подбора формы производимого изделия, дизайн включает в себя расчеты его конструктивных и функциональных характеристик, а также управление его жизненным циклом. Этот период характеризуется последовательной автоматизацией проектирования дизайна, а также существенным расширением инструментария проектирования, включая анимацию и другие методы визуального представления динамических ситуаций [4, с. 30]. Наиболее используемыми программными продуктами для промышленных дизайнеров являются SolidWorks, Autodesk Alias и Rhino, также используются Inventor, modo, Maya, 3DS Max, Sketchup и Fusion 360 [111].

В 2014 г. компания solidThinking, входящая в состав корпорации Altair Group, объявила о запуске программных продуктов для инженеров-конструкторов (solidThinking Inspire) и промышленных дизайнеров (solidThinking Evolve). Разработчики программных продуктов скрыли от пользователя всю сложность применяемых инструментов, тем самым сделав их более доступным для большого круга специалистов. Этот процесс отвечает одному из трендов в компьютерном инжиниринге – «демократизация технологий», когда ранее сложные в освоении CAE/CAO-технологии, основанные на решении уравнений в частных производных и применяемые в основном экспертами – инженерами-расчетчиками, становятся доступными инженерам-конструкторам (более подробную информацию о CAE-системе solidThinking Inspire см. в разделе «1.2 Топологическая оптимизация в сочетании с традиционными и аддитивными методами производства»).

Программный продукт solidThinking Evolve предоставляет возможность быстро, эффективно и с наименьшими затратами усилий промышленного дизайнера разрабатывать и менять концептуальные формы моделей, объектов, конструкций и изделий для разных отраслей промышленности – от автомобилестроения и авиастроения до медицины, спортивного инвентаря и современной киноиндустрии. Программный продукт сочетает в себе беспрецедентную свободу конечно-элементных расчетов и одновременно контроль параметров моделируемого изделия. Evolve предлагает варианты, которые могут быть развиты в готовый продукт и легко экспортированы в любую современную CAD-систему. Использование этой программной системы позволяет создавать органичные изделия на основе бионических принципов и форм в кратчайшие сроки [64].

Рисунок 35. Промышленный дизайн концепции беговых кроссовок в solidThinking Evolve



Источник: [112]

Учитывая тот факт, что скорость выведения на рынок новых моделей промышленной продукции и уровень ее сложности будут продолжать расти, скорость производства продукта должна быть сопоставима со скоростью его разработки. Это достигается путем внедрения аддитивных технологий в промышленный дизайн.

В 2014 г. была напечатана первая в мире велосипедная рама из титана, при проектировании и топологической оптимизации которой был использован программный пакет solidThinking Inspire [113]. Команда Renishaw, объединившись с Empire Cycles, построила раму для горного велосипеда MX-6 Evo, который до этого был представлен только в алюминиевой версии. Для производства рамы из титана инженеры использовали лазерную установку AM250, мощный лазер на иттербиевом волокне, который выборочно сплавлял между собой частицы титанового порошка и формировал секции рамы.

Рисунок 36. Промышленный дизайн велосипедной рамы, полученный при помощи solidThinking Inspire и 3D-печати

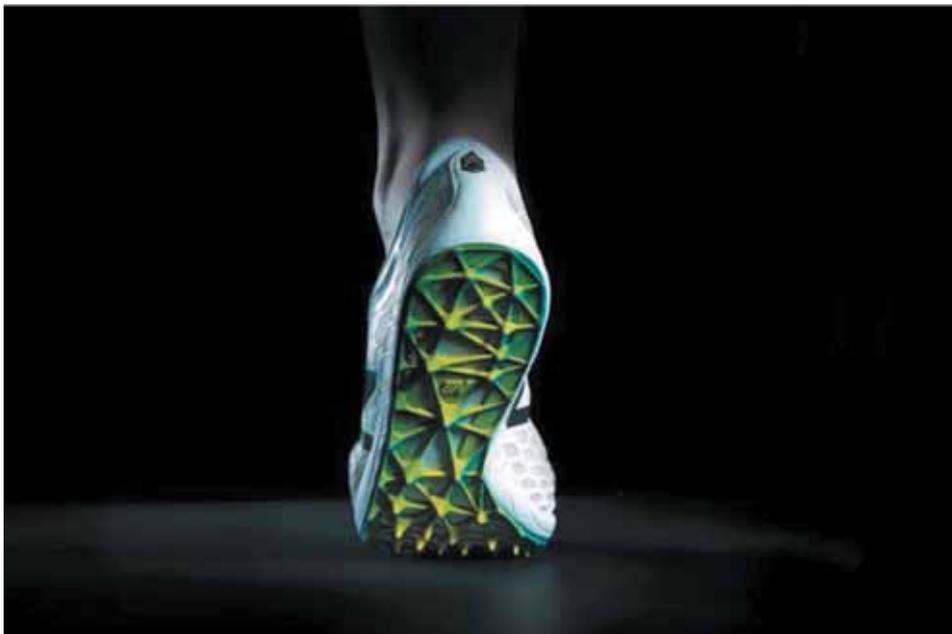


Источник: Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ по материалам [114]

Для определения зон в каждой из секций рамы, где необходимо использовать титан, исходя из требований жесткости, прочности и т. д., инженеры-конструкторы использовали специальное программное обеспечение, предназначенное для топологической оптимизации – solidThinking Inspire. В итоге инженерам удалось снизить вес на 1400 граммов, при этом общий вес рамы был уменьшен на 33%, но, самое главное, прочность титановой рамы была в шесть раз выше, чем у рамы из алюминия [115].

В настоящее время передовые технологии также активно используются в производстве спортивной и модной обуви. В марте 2015 г. компания New Balance представила разработанные и затем напечатанные на 3D-принтере компоненты для кроссовок, с помощью которых спортсмены смогут бегать гораздо быстрее. В процессе бега спортсменам помогает трение, которое возникает между поверхностью дорожки и шипами, расположенными на подошве кроссовок. Для получения максимального результата компания New Balance во время создания трехмерных шипованных пластин использовала технологию селективного лазерного спекания. При создании этой уникальной спортивной обуви компания New Balance основывалась на персонализированном (кастомизированном) подходе. После изучения биомеханических характеристик каждого спортсмена все полученные данные использовались в процессе проектирования и затем – в процессе аддитивного производства с помощью 3D-принтера EOSINT P 395, который обеспечил печать индивидуальных 3D-шипов для каждого бегуна. Кроме того, трехмерные кроссовки оснащаются датчиками, с помощью которых можно уточнить картину динамического контактного взаимодействия во время бега. В дополнение ко всему кроссовки имеют встроенные сенсоры, которые позволяют визуализировать контактные взаимодействия между стопой спортсмена и внутренней поверхностью кроссовок [116].

Рисунок 37. Промышленный дизайн кроссовки компании New Balance



Источник: [116; 117]

Благодаря компьютерному проектированию и аддитивным технологиям создание новой пары «кастомизированной» обуви занимает всего лишь один месяц при участии одного специалиста, причем основное время занимают промышленный дизайн изделия и оптимальный дизайн персональной конструкции, а печать кроссовок на 3D-принтере занимает всего один-два дня (для сравнения – традиционный способ производства обуви требует участия в работе 12 человек и занимает 4–6 недель) [118]. Для дополнительной характеристики современного аддитивного производства отметим, что для изготовления кастомизированных / «дизайнерских» туфель из нейлона уходит не более 9 часов времени [119].

Рисунок 38. Примеры промышленного дизайна обуви



Источник: [118; 119]

Передовые технологии используются также и при создании игрушек:

1. В мае 2015 г. компания Seven:Twelve Engineering выпустила на рынок конструктор Crossbeams, из которого с помощью компьютерной программы можно самостоятельно спроектировать, а затем собрать разнообразные игрушки – как стационарные (фигуры животных, корабли, ракеты и др.), так и движущиеся (автомобили, вертолеты и др.). Конструктор выполнен в виде маленьких трубочек из твердого пластика. В собранном виде игрушки могут достигать 1,4 метра в ширину и 2,3 метра в высоту [120].

Рисунок 39. Конструктор Crossbeams компании Seven:Twelve Engineering



Источник: [120; 121]

2. Студенты частного университета Art Center College of Design в Пасадене (США, штат Калифорния) Макс Гринберг, Самир Елесварупу и Иан Каллимор использовали принцип строения костей скелета при разработке радиоуправляемой игрушечной машины Cirin, предназначенной для участия в ежегодной международной вузовской гонке мини-болидов Formula E Race. Кузов имеет изящную конструкцию, подобную костям птичьих крыльев, обеспечивающую легкость и прочность машины. Для изготовления каркаса использовался полиамид, а сама конструкция выращивалась на 3D-принтере методом селективного лазерного спекания.

В движение радиоуправляемый Cirin приводится благодаря резиномотору, который представляет собой комбинацию смотанного в петли 5-метрового резинового жгута, помещенного в трубку из углеволокна, и механической передачи (шестеренки), соединяющей трубу и задний мост. «Заводится» механизм вручную, для этого нужно плотно закрутить пучок резиновых петель. В этом состоянии он удерживается до момента старта с помощью сервопривода. После запуска жгут начинает стремительно раскручиваться, вращая трубу, которая передает крутящий момент на задний мост. Cirin может разогнаться до 48 километров в час, а ручного «завода» хватает на 150-метровую дистанцию. За управление и тормозную систему мини-боида отвечает еще один сервопривод [122].

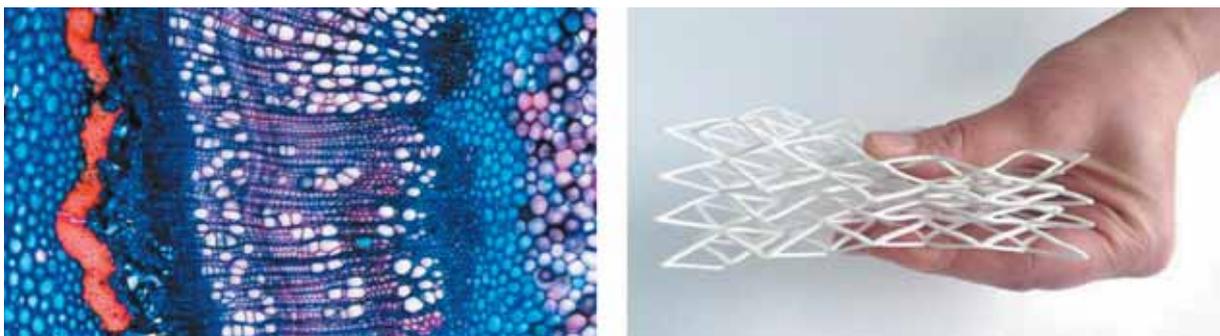
Рисунок 40. Мини-болоид Cirin



Источник: [122]

Изделия, созданные с учетом индивидуальных характеристик человека, наиболее часто встречаются в домашнем интерьере. В этой связи стоит привести пример еще одной разработки для интерьера – 3D-печатного мягкого кресла «Биомимикрия». Промышленный дизайнер Лилиан ван Даал, вдохновленная естественной структурой клеток, создала мягкое концептуальное кресло, используя не традиционную технику производства мебели, а собственную клеточную конструкцию, которая поддерживает вес сидящего на нем человека. Кресло изготовлено из прочного нейлона и напечатано на 3D-принтере. При этом можно изменить различные зоны гибкости, чтобы она соответствовала потребностям пользователя [123].

Рисунок 41. 3D-печатное мягкое кресло «Биомимикрия»





Источник: [123]

Таким образом, использование систем проектирования (CAD), компьютерного инжиниринга и оптимизации (CAE, CAO) в промышленном дизайне значительно ускорило процесс проектирования и визуализации продукта, позволило разрабатывать оптимальные с точки зрения веса и прочности конструкции, привело к сокращению стоимости и времени разработки. Применение аддитивных технологий позволило производить продукты ранее немислимых форм, размеров, фактически новые мезоструктуры и, казалось бы, из несочетаемых материалов, обладающих той или иной микроструктурой, что является ярким примером многоуровневого / многомасштабного (MultiScale) подхода к проектированию и аддитивному производству. Понятно, что возможности конструирования и производства конкурентоспособной кастомизированной продукции резко выросли. В ближайшем будущем передовые технологии позволят создавать недорогие изделия с оптимальной функциональностью, промышленным качеством изготовления и, конечно же, с индивидуальным дизайном.

3 Бионический дизайн в технике и медицине

Использование бионических принципов при проектировании и создании изделий нового поколения в технике и медицине пока не нашло массового промышленного внедрения. Это обусловлено целым рядом факторов, в том числе отсутствием достоверных данных о возможностях такого применения, отсутствием стандартов, низким уровнем технологической готовности и т. д. Тем не менее ряд крупных компаний развивает бионический дизайн как перспективное и критически важное направление своей деятельности. Этого требует не только глобализация рынков, гиперконкуренция и устойчивый спрос на интеллектуальноемкую продукцию, но и расширившиеся в начале XXI в. технологические возможности, в числе которых стремительное развитие компьютерного инжиниринга, технологий оптимизации и аддитивного производства играет доминирующую роль.

Ниже дана краткая характеристика некоторых успешных примеров применения бионических принципов в автомобилестроении, машиностроении, робототехнике, медицине и передовых материалах, в оборонно-промышленном комплексе и авиакосмической отрасли.

3.1 Автомобилестроение и машиностроение

Bionic car Mercedes-Benz

Принципы функционирования живой природы постепенно начинают внедряться в автомобилестроении. Одной из первых компаний, применивших бионические принципы, стал немецкий автоконцерн Mercedes-Benz, представивший в 2005 г. концепт-кар, биологическим прототипом которого стала рыба-коробочка или, как ее еще называют, кузовок. Уже одно название этой рыбы указывает на сходство с автомобилем. Сделать машину похожей на эту маленькую рыбу решили не случайно. Во-первых, строение тела рыбы-коробочки позволяет передвигаться с наименьшими энергозатратами. Во-вторых, поскольку тело рыбы должно выдерживать сильное давление, это предполагает наличие достаточно жесткой внешней оболочки. В-третьих, несмотря на кажущуюся неповоротливость, рыба-коробочка обладает большой маневренностью, так как обитает в коралловых рифах, а специфическая форма тела ни в коей мере не создает помех при передвижении. Внешний покров рыбы состоит из костистых пластинок шестиугольной формы, которые формируют своеобразные «доспехи», обеспечивающие маневренность и выполняющие также защитную функцию.

Базируясь на природном решении, инженеры Mercedes создали облегченную конструкцию кузова, оптимизированную при помощи передовой CAO-системы OptiStruct. Консультантами выступили специалисты DaimlerChrysler, которые предложили технологию оптимизации, основанную на методе Soft Kill, позволяющем менять толщину и совсем убирать материал в местах меньших механических напряжений и добавлять его в наиболее нагруженные зоны, которые должны «нести» повышенную нагрузку. В результате применения передовых технологий компьютерного инжиниринга и оптимизации была получена оптимальная с точки зрения аэродинамики геометрия кузова, а также обеспечена максимальная прочность при минимальном весе и количестве использованного материала [124; 125].

Рисунок 42. Бионический автомобиль компании Mercedes-Benz (Bionic car)



Источник: [126]

Футуристические концепт-кары EDAG

В 2013 г. немецкая компания EDAG разработала концепт-кар Genesis, прототипом которого является черепаха. Как известно, панцирь черепахи, «сэндвичная» структура которого придает ему большую прочность, прекрасно выполняет защитную функцию, обеспечивая в том числе и ударостойкость. Кузов EDAG Genesis, изготовленный при помощи аддитивных технологий, спроектирован по сходному принципу, имеет ту же скелетообразную структуру, что и черепаший панцирь, и призван обеспечивать дополнительную безопасность пассажиров. Революционная модель была представлена на автомобильной выставке в Женеве Geneva Show 2014.

В данном случае применение аддитивных технологий позволило приблизиться к осуществлению инженерных решений на основе бионических принципов (принципов бионического дизайна), что ранее казалось невозможным и тормозилось несовершенством традиционных технологий. К примеру, плавного сопряжения галтелей не добиться при помощи фрезерования и прочих традиционных технологий металлообработки. 3D-печать дала возможность сделать этот процесс более гибким, в частности, требующим изготовления меньшего количества оснастки, менее затратным в плане ресурсов и, наконец, более экологичным (используя современную технологию, можно утверждать о применении «наилучших доступных технологий»). Кроме того, аддитивные технологии дали больше свободы инженерам, позволив изготавливать специфичные и сложные детали, а также сделали производственный процесс более гибким в плане логистики, осуществив децентрализацию производства [127].

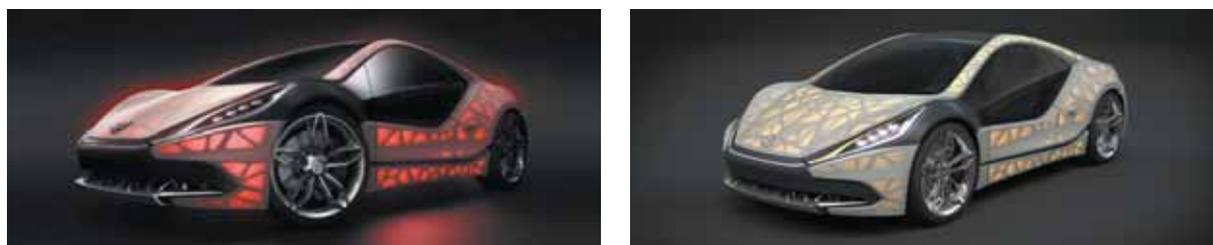
Рисунок 43. Концепт-кар EDAG Genesis



Источник: [126]

Год спустя та же компания представила на выставке Geneva Motor Show 2015 новый концепт спортивного автомобиля – Light Cocoon, спроектированный с использованием облегченных конструкций (lightweight structures), решетчатых (скелетообразных) конструкций [130]. При разработке такого сверхоригинального дизайна использовалась топологическая оптимизация, а сами детали были напечатаны на 3D-принтере. Для защиты от плохих погодных условий, а также для достижения эстетического эффекта снаружи кузова использовался специальный текстильный материал Texapore Softshell, биологическим прототипом которого является древесный лист.

Рисунок 44. Концепт-кар EDAG Light Cocoon





Источник: [130; 131; 132]

Такие решетчатые конструкции, похожие по строению на кости скелета, – достаточно универсальное решение в случаях, когда необходимо добиться оптимального распределения нагрузки, используя минимум материала. EDAG применяет этот принцип при проектировании транспортных средств с большой грузоподъемностью. Примером может служить оптимизированная конструкция шасси и кабины для грузовика Power Entry Concepts. Помимо необходимой прочности и надежности при значительно меньшем по сравнению с традиционными аналогами весе, она также облегчает водителю доступ в кабину и, самое главное, обеспечивает более надежную защиту человека. Кроме того, благодаря значительно меньшему количеству запчастей стоимость конструкции оптимальна. Кабина не только обладает впечатляющими техническими характеристиками, но и полностью удовлетворяет стандарту ECE R29-3, который вступит в силу только в 2017 г. [133]

Рисунок 45. Конструкция шасси и кабины грузовика Power Entry Concepts



Источник: [133]

Cadillac Aera

Сходная идея решетчатой конструкции кузова наблюдается и у концепта Cadillac Aera, который был представлен на автосалоне Auto Show Design Challenge в Лос-Анджелесе в 2010 г. Как отмечалось ранее, такое решение позволяет в значительной степени снизить вес автомобиля и улучшить его аэродинамические характеристики. Необычная многогранная поверхность заимствует форму соединения мыльных пузырей. Гибкая полимерная внешняя оболочка также является облегченной альтернативой традиционным панелям кузова и стеклу [134].

Рисунок 46. Концепт-кар Cadillac Aera

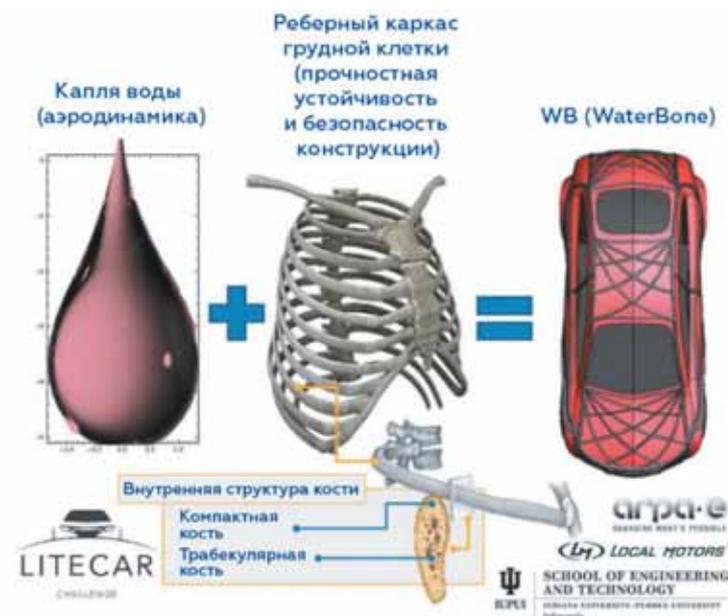


Источник: [134]

WaterBone Vehicle Design

В январе 2015 г. на конкурсе проектов в сфере транспорта из облегченных конструкций LITECAR Challenge, который традиционно проводит Агентство передовых исследований в области энергетики США (ARPA-E) победил проект Aerodynamic Water Droplet with Strong Lightweight Bone Structure, разработанный командой инженерно-технологического факультета Университета Индианы-Пердью Индианаполис. Проект заимствует сразу два бионических принципа: кузов сконструирован в форме капли, что позволяет улучшить аэродинамические характеристики, а пористый скелетоподобный каркас позволяет лучше амортизировать удар при столкновении, повышая безопасность пассажиров [135; 136]. Каркас изготовлен из алюминиевого сплава при помощи технологии 3D-печати, а элементы соединения каркаса с кузовом – из полимерного композита. В результате передовые технологии компьютерного инжиниринга и оптимизации обеспечили в этом проекте меньший вес всей конструкции, улучшенную аэродинамику и экономию топлива.

Рисунок 47. Проект Aerodynamic Water Droplet with Strong Lightweight Bone Structure



Аэродинамичный дизайн
+ энергопоглощающая зона (зона деформации),
обеспечивающая безопасность пассажиров



Источник: Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ по материалам [135]

Бионические принципы проектирования в автомобилестроении применяются не только при разработке общей конструкции машин, но и для усовершенствования отдельных запчастей:

1. Испанское инжиниринговое бюро Alligerator разработало три детали для кара Formula Student F0711-7: передний и задний угловые рычаги подвески и педаль тормоза. Сам автомобиль был спроектирован командой Rennteam Uni Stuttgart из Штутгартского университета и победил на трех международных соревнованиях в 2012 и 2013 гг. – Formula Student Germany 2012, Formula SAE Italy 2012 и Formula SAE Michigan 2013. Также он занял пятое место на Formula Student UK 2012 и первое в рейтинге World Ranking 2012 [137].
2. Компания BMW совершенствует дизайн запчастей для автомобильной марки Mini при помощи топологической оптимизации: компания Meridian Lightweight Technologies Inc. разработала новый дизайн поперечной балки, которая весит всего 4,49 килограмма, что совсем немного для подобного изделия [138].

ELiSE

Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (г. Бремерхафен, Германия) использует технологию ELiSE (Evolutionary Light Structure Engineering) для оптимизации конструкций обода колеса автомобиля по заказу компании RLE International. В данном случае в качестве основы, заимствованной из живой природы, послужили диатомовые водоросли *Arachnoidicus* (одноклеточный планктонный организм), а за счет бионического дизайна, компьютерного инжиниринга и оптимизации удалось добиться снижения веса обода на 20%. Сама конструкция может быть изготовлена из композиционных материалов, укрепленных углеволокном.

Рисунок 48. Оптимизация обода колеса автомобиля на основе водоросли *Arachnoidicus*



Источник: [139; 140]

Та же технология ELiSE применяется и для оптимизации конструкций опор морских ветровых энергетических установок. В качестве основы, заимствованной из живой природы, служит скелет радиолярии (одноклеточный планктонный организм). За счет бионического дизайна и оптимизации удается достигнуть снижения веса ВЭУ на 48% с 770 до 400 тонн и лучшего распределения нагрузки [139].

Рисунок 49. Оптимизация опоры морской ветровой энергетической установки на основе скелета радиолярии



Источник: Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ по материалам [139]

Электропоезд серии 500 высокоскоростной сети железных дорог «Синкансэн»

Бионические принципы с успехом применяются и в железнодорожном машиностроении, например, при проектировании электропоездов. Так, клюв зимородка стал живым образцом, по которому был создан носовой конус высокоскоростного поезда серии Shinkansen 500 [141]. Данная форма конуса помогла решить давнюю и достаточно острую проблему: при прохождении поездом тоннелей, которых в Японии достаточно много, в результате сдавливания воздуха раздается резкий хлопок, сравнимый по громкости со взрывом. Поскольку японские законы относительно шумового загрязнения достаточно строги, а от местных жителей поступали многочисленные жалобы, проблема требовала решения. Эйдзи Накацу, инженер, руководивший испытаниями высокоскоростного поезда, а в свободное время орнитолог-любитель, обратил внимание на то, как зимородок при ловле рыбы входит в воду, практически не поднимая брызг. Этот процесс, наблюдаемый в живой природе, послужил основой для оптимального проектирования носовой части поезда. В результате обтекаемая форма позволила устранить нежелательные динамические явления и попутно обеспечила сокращение энергетических затрат примерно на 15% за счет снижения аэродинамического сопротивления. Отметим также, что клюв зимородка послужил прообразом и для специальной конструкции углубленных фар поезда.

Рисунок 50. Использование бионических принципов в железнодорожном машиностроении: слева – зимородок, справа – поезд «Синкансэн» серии 500



Источник: [142; 141]

3.2 Робототехника

Бионическая стрекоза Bionic Opter

Немецкая технологическая компания Festo в рамках научно-исследовательской программы Bionic Learning Network, направленной на поиск инновационных технических решений, создала устройство Bionic Opter, имитирующее полет стрекозы [143]. Известно, что полет стрекозы отличается сложными техническими характеристиками: так, стрекоза может зависать в воздухе, парить, не двигая крыльями, и совершать большое количество маневров. Такая сложная техника полета давно занимала умы инженеров, проектирующих беспилотники. Стрекоза Festo создана из облегченных конструкций (lightweight structures) и способна практически полностью повторять полет своего биологического прототипа. Размах крыльев Bionic Opter составляет 63 сантиметра, каждое крыло армировано углеволокном в синтетической мембране. В дополнение к системе управления общей частотой взмахов и поворотом каждого отдельного крыла в каждое из них интегрирована система управления амплитудой, благодаря которой силу тяги можно регулировать. Угол поворота крыла зависит от направления вектора тяги. Устройство может управляться дистанционно при помощи цифрового передатчика или обычного смартфона [144].

Рисунок 51. Использование бионических принципов в робототехнике: слева – стрекоза, справа – дрон-стрекоза Bionic Opter



Источник: [145; 143]

Робот-саламандра Pleurobot

Швейцарские ученые создали машину под названием Pleurobot, довольно точно копирующую вид и движения своего живого прототипа – саламандры. С этой целью удалось отследить 64 точки мышц, кожи и костей животного с помощью трехмерного рентгеновского сканирования скелета и отдельных частей тела животного во время его движения по суше и во время плавания. Pleurobot получил нейронную сеть Central Pattern Generators, которая повторяет нервные цепи спинного мозга саламандры. Благодаря этому робот может совершать даже те движения, на которые не способна саламандра. Робот имеет низкий центр тяжести, который обеспечивает хорошую устойчивость. Такое сочетание дает все основания полагать, что робот может быть успешно задействован в поисково-спасательных операциях [146].

Рисунок 52. Использование бионических принципов в робототехнике: слева – саламандра, справа – робот Pleurobot



Источник: [147; 148]

3D-принтеры-роботы для печати конструкций в воздухе

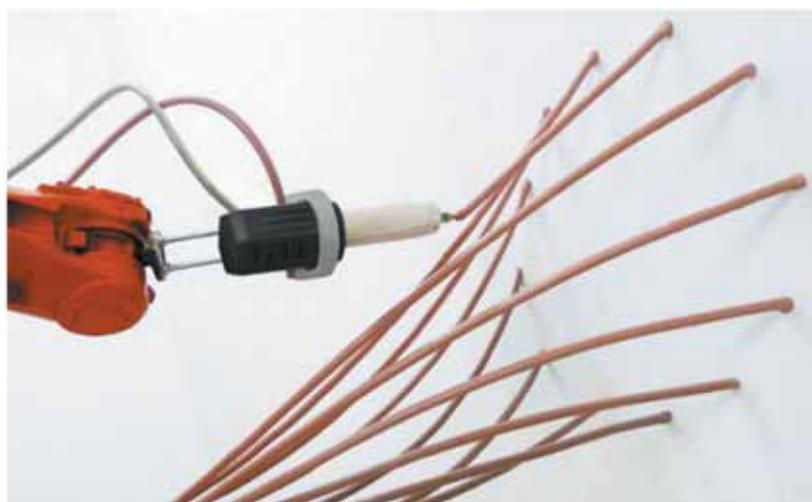
В качестве яркого примера современного бионического дизайна назовем технологию трехмерной печати сложных промышленных конструкций в воздухе. В Амстердаме специалисты лаборатории перспективных технологий Joris LAARMAN Lab создали новый тип 3D-принтера на базе промышленного робота, который может делать сложные и самоподдерживающиеся конструкции из различных металлов (разных типов стали, алюминия, бронзы и меди).

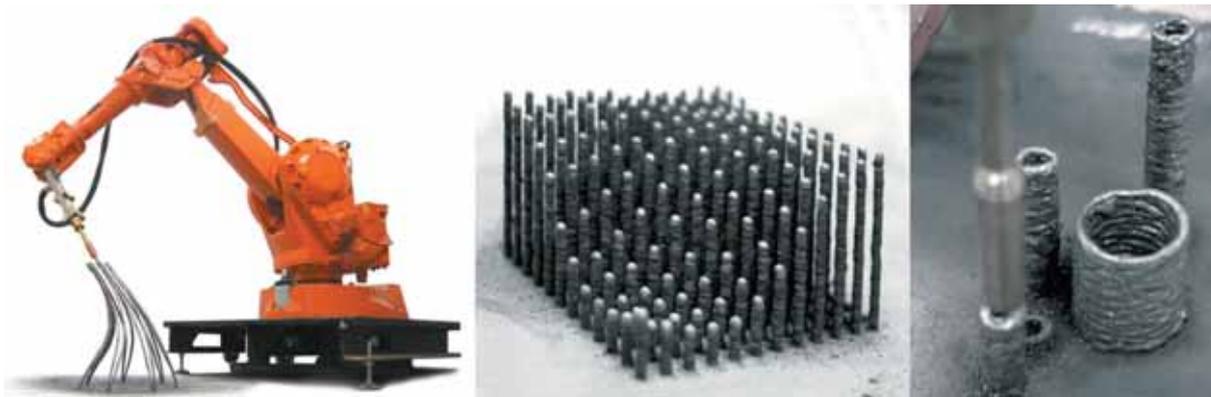
Фактически робот MX3D-Metal является наполовину принтером и наполовину сварщиком. Для печати конструкций используется роботизированная рука с 6 степенями свободы, которая фактически управляет аппаратом, комбинирующим сварку и непрерывную подачу металла. При помощи различных режимов и технологий электродуговой сварки получается конструкция, составленная из мелких расплавленных капель металла, то есть сварка без свариваемых поверхностей – сплошной сварной шов.

Для реализации такой сложной сварочно-печатной технологии был разработан специальный комплекс управляющего программного обеспечения. Это программное обеспечение управляет по отдельности робототехнической и сварочной частью робота MX3D-Metal, позволяя с его помощью делать различные типы пространственных линий, прямых, изогнутых, спиральных, геликоидальных и т. д., что требует особых параметров настройки.

Созданию данного принтера-сварщика предшествовала совместная разработка 3D-принтера MATAERIAL (MX3D-Resin) Петра Новикова и Саши Йоковича из Института современной архитектуры Каталонии (Institute for Advanced Architecture of Catalonia) и Joris LAARMAN Lab в 2013 г. Разработанный 3D-принтер создает конструкции на весу, выдавливая термореактивные полимеры из насадки печатающей головки, смола быстро твердеет, что делает возможным создание конструкций на любой рабочей поверхности, независимо от ее наклона и гладкости, и без необходимости дополнительных опорных конструкций.

Рисунок 53. 3D-принтеры-роботы MX3D-Metal и MX3D-Resin



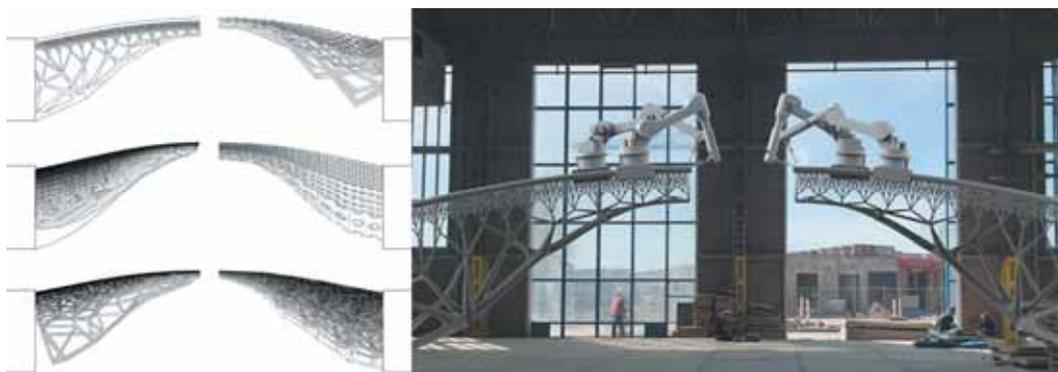


Источник: [149; 150]

В конечном счете Joris LAARMAN Lab планирует создать унифицированный интерфейс для принтера MX3D-Metal и ему подобных, который будет достаточно прост для того, чтобы им мог пользоваться любой человек, имеющий начальные навыки работы с программами автоматизированного проектирования (Computer-Aided Design, CAD). По мнению руководителя группы разработчиков Йориса Лаармана, такой подход может обеспечить быстрое продвижение в промышленность и начало широкого применения нового типа принтеров – MX3D-Metal [151] – 3D-принтеров-роботов.

В сентябре 2015 г. с помощью данной технологии планируется напечатать стальной пешеходный мост через один из многочисленных каналов Амстердама. Поскольку мост планируется печатать прямо над водой, то 3D-принтерам-роботам будет необходимо одновременно создавать жесткую, прочную и устойчивую конструкцию, в реальном времени организовывая себе поддержку и передвигаясь всё дальше от берега. Для всей операции разработчики намерены использовать четыре принтера, которые будут одновременно возводить с разных берегов две симметричные половины моста, пока не соединят их в единую конструкцию [152].

Рисунок 54. Печать «бионического» моста при помощи 3D-принтеров-роботов MX3D-Metal



Источник: [153]

Реализация этого проекта и последующее успешное внедрение данной технологии в строительство и промышленность предоставит дизайнерам практически неограниченные возможности для создания с помощью 3D-печати больших пространственных функциональных объектов (облегченных конструкций) из экологически чистых материалов и с беспрецедентной свободой в выборе форм.

3.3 Медицина и передовые материалы

Протезы

Протезирование – один из старейших примеров применения бионических принципов. После простейших протезов, известных с древних времен (деревянная палка вместо утраченной ноги), в XIX в. появились более качественные, такие как рука генерала Е.В. Давыдова (1775–1823), подобная человеческой по форме, с помощью которой можно было писать и даже тасовать карты [154]. Однако главная задача – восстановление функций и чувствительности – долгое время оставалась неразрешимой. В середине XX в. были разработаны образцы биоэлектрической системы управления, которые оформлены в виде искусственной кисти руки человека, приводимой в движение биотоками мышц, сгибающих и разгибающих пальцы [155]. Относительно недавно стало возможным изготавливать протезы конечностей, которые соединяются с нервными окончаниями и возвращают хозяину чувствительность. Кроме того, такие протезы могут быть достаточно просты в управлении и контролироваться с помощью обычного смартфона. Существуют и достаточно совершенные протезы глаза и слуховые аппараты, помогающие вернуть утраченное зрение и слух.

Весьма успешно протезируются и отдельные кости и суставы. До недавнего времени подобные операции затруднялись тем, что протезы должны изготавливаться в строжайшем соответствии с физиологическими особенностями пациента, которые, как известно, индивидуальны. Изготовление на заказ – процедура очень дорогостоящая и далеко не каждый может себе это позволить. Однако с развитием 3D-печати такие проблемы стали разрешимы. Так, недавно в Китае была прооперирована девушка по имени Ли Цзеян, у которой диагностировали агрессивную форму рака. Болезнь поразила левую лопатку и быстро прогрессировала. При таких обстоятельствах люди часто теряют руку, но на сей раз руку удалось спасти. Врачи при помощи снимков компьютерного томографа изготовили в 3D-редакторе точную реплику лопатки, а затем напечатали на 3D-принтере пластиковую модель, по которой изготовили титановый протез. Операция прошла успешно, на данный момент девушка проходит реабилитацию [156].

Рисунок 55. Использование бионических принципов в медицине: слева – пластиковая модель лопатки, справа – титановый протез



Источник: [156]

Наряду с протезированием бионические принципы в медицине активно применяются при разработке экзоскелетов. Так, японская компания Cyberdyne Incorporated начала всемирные продажи своего экзоскелета HAL, призванного вернуть парализованным людям способность самостоятельно ходить. HAL управляется мозговыми волнами человека [157]. Подобные разработки применяются не только в медицине, но и в военном деле. Американская компания Lockheed Martin совместно с Parker Hannifin занимается разработкой экзоскелета HULC [158], а Raytheon тестирует XOS-2 [159]. Не отстают от них и французы с экзоскелетом Hercule – разработкой Главного управления по вооружениям Франции (DGA). Все три конструкции создаются с целью повышения боеспособности солдат. В России разрабатывается экзоскелет EXOATLET, который будет применяться для реабилитации людей с заболеваниями опорно-двигательного аппарата [160].

Бионическое сердце

На сегодняшний день развитие медицины и, в частности протезирования, идет настолько быстро, что создается впечатление, что скоро станет возможным «собрать» весь человеческий организм из различных деталей, повторяющих природные оригиналы. Недавно учеными Квинслендского технологического университета в Брисбене (Австралия) был разработан аппарат, способный заменить человеческое сердце. Его уникальность заключается в том, что в отличие от своих предыдущих аналогов он избавлен от громоздких механизмов, имитирующих биение пульса, и сконструирован как вращающийся титановый диск, перекачивающий кровь по организму. Таким образом, пульс вообще отсутствует, а значительно более простая конструкция снижает риск поломки. Использование же магнитной левитации предотвращает износ компонентов и гарантирует долговечность аппарата. «Бионическое сердце» уже было успешно протестировано на овце, а в течение трех-пяти лет планируется начать испытания на людях [161].

Рисунок 56. Бионическое сердце



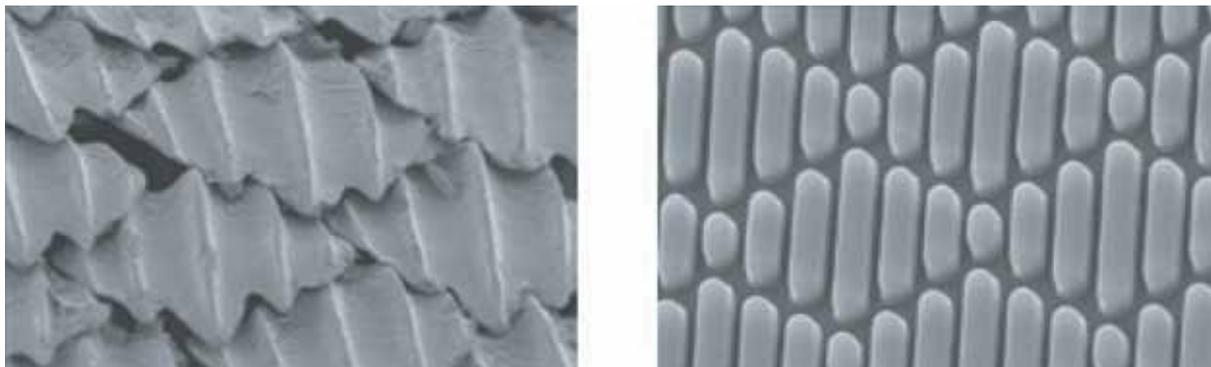
Источник: [161]

Антимикробное покрытие Sharklet

У живой природы могут заимствоваться и принципы строения различных тканей и материалов. К примеру, материал, получивший название Sharklet, был разработан профессором Университета штата Флорида Энтони Бреннаном [162]. Бреннан, чьей сферой интересов помимо материаловедения была биоинженерия, долгое время работал над проблемой зарастания водорослями днищ судов и подводных лодок. Проводя исследования, ученый заметил, что галапагосские акулы не зарастают водорослями, несмотря на то, что они очень малоподвижны. Бреннан установил, что кожа акулы испещрена мелкими бороздками. Подобная текстура препятствует размножению

бактерий, но не химическим, а механическим путем. Основываясь на этом открытии, команда инженеров под руководством Бреннана, разработала покрытие, состоящее из «чешуек», размеры которых не превышали 26×3 микрона, и позволяющее предотвратить зарастание водорослями без использования токсичных химикатов. Данное открытие нашло свое применение в судостроении и медицине.

Рисунок 57. Использование бионических принципов при создании передовых материалов: слева – кожа галапагосской акулы, справа – пленка Sharklet



Источник: [163]

3.4 Оборонно-промышленный комплекс

Бронежилеты

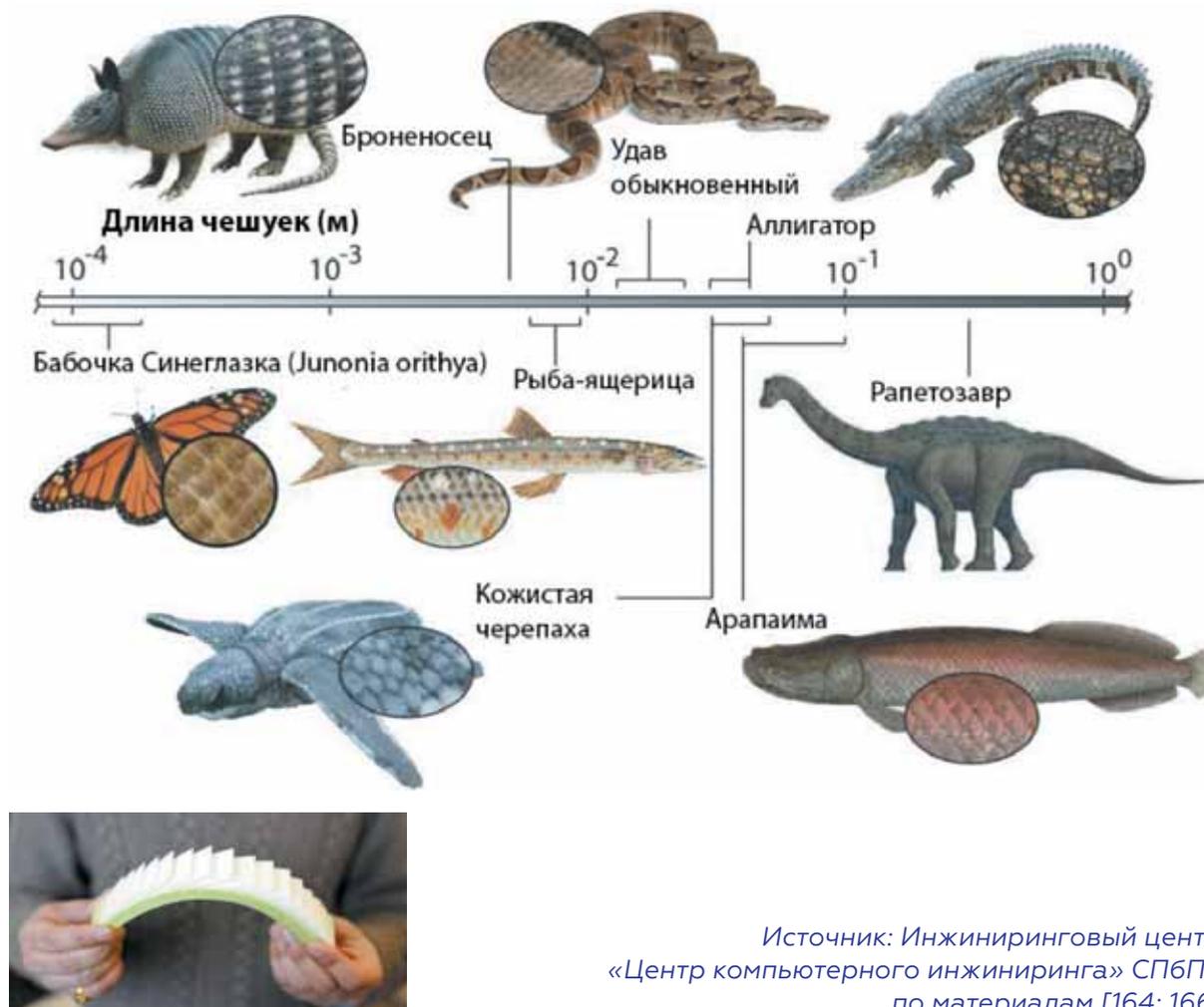
Природа подсказывает решения и при разработке военной экипировки, например, бронежилетов. Командой исследователей бостонского Северо-Восточного университета (Northeastern University) разрабатывается броня, в основе структуры которой лежат принципы строения рыбьей чешуи, змеиной кожи и крыльев бабочки.

Чешуя рыб уже давно является предметом повышенного интереса ученых, поскольку она, с одной стороны, обеспечивает надежную защиту, а с другой – не ограничивает свободу движений. При этом обычно исследуется устройство самих чешуек, а также их прочностные и защитные свойства. Научные сотрудники Инженерного колледжа Северо-Восточного университета, однако, решили сфокусироваться на контактном взаимодействии как самих чешуек, так и кожи, к которой они прикреплены.

В природе чешуйчатые структуры оптимизированы для выполнения различных функций – защиты (например, у рыб), подвижности (у змей), оптических эффектов окраски (у бабочек). По мнению ученых, можно разработать броню, которая объединила бы все эти свойства, причем, благодаря использованию самых современных материалов, можно создать защиту даже более эффективную, чем у природных аналогов [164; 165; 166].

Разрабатываемая броня состоит из двух слоев – мягкой основы и встроенных в нее пластинок-«чешуек», распечатанных на 3D-принтере. При помощи созданной математической модели исследователи изменяли размер и порядок крепления пластин на разных типах подложек, чтобы определить, как это повлияет на защитные свойства и гибкость конструкции, и добиться оптимального соотношения этих характеристик. При этом предполагается, что броня должна препятствовать пробиванию и быть устойчивой к высоким температурам.

Рисунок 58. Использование бионических принципов в оборонно-промышленном комплексе: структура чешуи у разных животных и броня, разработанная командой бостонского Северо-Восточного университета



Бронетехника

Бионические принципы используются не только при изготовлении брони, предназначенной для защиты человека, но и при производстве бронетанковой техники, причем заимствуется не одно конкретное свойство или принцип, и даже не несколько, а целый комплекс. Как отмечает специалист по индустриальному дизайну Алексей Быстров, «изучение путей развития бронетехники, внутренней структуры и взаимосвязей в принципах ее построения, характера использования ее на поле боя выявило очевидные аналогии с анатомией, поведением, средствами маскировки, защиты и нападения, встречающимися в живой природе». Бионические принципы применялись при изготовлении бронетанковой техники с самого начала зарождения танков как класса боевых машин. Само название «гусеница» явно указывает на заимствование принципа передвижения природного аналога. Однако принцип конструкции танковых траков заимствуется у другого животного – кошки и сходен по строению с кошачьей лапой: траки имеют специальные грунтозацепы, не дающие танку проваливаться в грунт. Из природы заимствуется и камуфлирующая окраска, и форма, и строение брони (хитиновый панцирь), и даже тактические приемы ведения боя (охота крупных хищников). Принцип действия прибора ночного видения также был взят у животных, имеющих обыкновение охотиться ночью [167].

Рисунок 59. Пример заимствования принципов из живой природы при создании бронетехники: слева – кошачья лапа с выпущенными когтями, справа – конструкция гусеничного движителя танка Т-90



Источник: [167]

3.5 Авиакосмическая отрасль

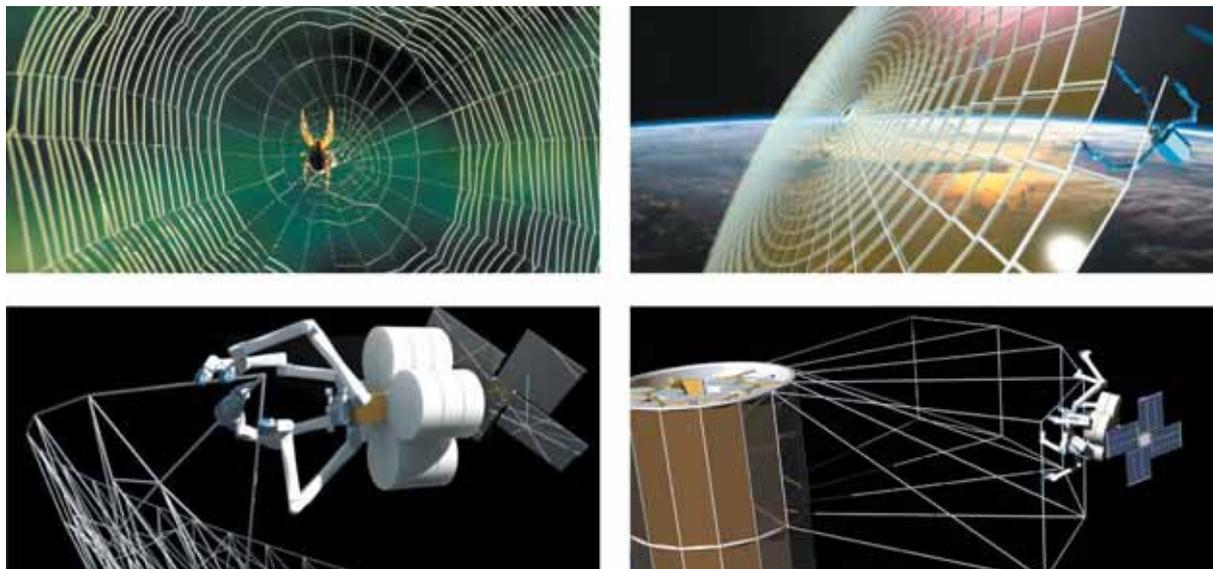
Космическая «фабрика-паук» (Spider Fab)

Бионические принципы лежат в основе строительства объектов крупных размеров в космосе. В 2013 г. программой NASA Innovative Advanced Concepts была выбрана компания Tethers Unlimited, предложившая принципиально новую концепцию создания многозадачных и крупногабаритных космических объектов, таких как антенны и панели. На сегодняшний день запуск объектов, размеры которых превышают несколько десятков метров, затруднен из-за ограниченного объема летательных аппаратов, а также сложности и хрупкости самих комплектующих. Подобные запуски – очень дорогостоящие мероприятия, и чем больше и сложнее деталь, тем выше стоимость. Запуск объектов, размеры которых превышают 100 метров в длину, на сегодняшний день невозможен [168; 169].

Революционным решением данной проблемы стала разработка системы Spider Fab («фабрика-паук»), использующей 3D-печать и робота-сборщика для производства отдельных частей космического корабля на орбите. Предполагается, что в космос будет запускаться аппарат, в котором в спрессованном виде будут находиться исходные материалы. Выйдя на орбиту, система сама воспроизведет себя по заданной программе с помощью роботов, используя аддитивную технологию послойного наплавления (Fused Deposition Modeling), подобно тому, как паук тклет паутину. Это позволит создавать объекты размером в сотни и даже тысячи метров в длину, а также на порядок снизит стоимость запуска. Кроме того, будет возможно собирать в космическом пространстве части, оставшиеся от устаревших и неисправных космических объектов, и создавать новые на их основе.

По замыслу разработчиков, «фабрика-паук» будет применяться для создания солнечных панелей, оптических приборов и сложных антенн, в частности антенн с высоким усилением, что позволит существенно улучшить качество связи в открытом космосе.

Рисунок 60. Использование бионических принципов в авиакосмической отрасли: сверху слева – паук, сверху справа и снизу – «фабрика-паук»

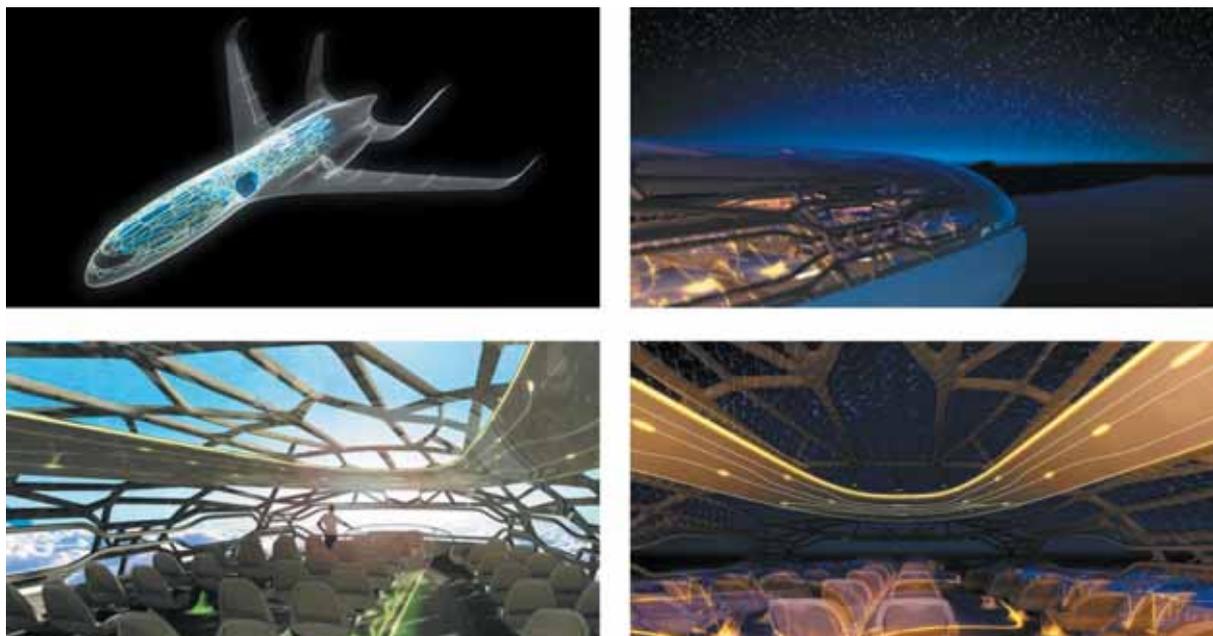


Источник: [170; 169; 171]

Футуристический проект компании Airbus

Одна из крупнейших авиастроительных компаний Airbus объявила о том, что к 2050 г. планирует разработку самолета, при проектировании корпуса которого будет использован принцип строения птичьего скелета. Вдобавок к прочности несущей конструкции подобный каркас позволит сделать стены самолета прозрачными, что будет обеспечивать дополнительный комфорт полета. Пропускающий свет материал обшивки корпуса также будет помогать регулировать температуру внутри лайнера [172].

Рисунок 61. Футуристический концепт самолета Airbus



Источник: [172]

Заключение

Стремительное развитие и широкое распространение новых технологий, создание и развитие высокоинтегрированных интеллектуальных сред и платформ, проникновение цифровых технологий во все сферы человеческой деятельности приводит к быстрым и значительным изменениям на глобальных рынках, в структуре и характере современного промышленного производства и экономики.

Передовые производственные технологии (Advanced Manufacturing Technology) находятся сегодня в фокусе промышленной, инновационной, научной и образовательной политики развитых стран, которая направлена на совершенствование и принципиальное изменение структуры производства, создание новых рынков, продукции и услуг. Именно передовые производственные технологии обеспечивают изготовление в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной и кастомизированной продукции нового поколения.

В настоящее время ярко выражен глобальный тренд одновременного стремительного развития и взаимного дополнения аддитивных технологий и технологий компьютерного инжиниринга, включая оптимизацию (многопараметрическую, топологическую, многокритериальную, многодисциплинарную и др.). Эффективное применение этих передовых технологий позволяет создавать оптимальные по различным характеристикам (вес, жесткость, прочность, вибрационные характеристики, долговечность и др.) и качественные изделия, машины и конструкции нового поколения, причем – проектировать, производить и выводить продукцию на рынок в предельно короткие сроки, снимая ограничения, характерные для традиционного производства.

Конвергенция и синергия двух технологических трендов дают возможность говорить о принципиально новом подходе к проектированию и созданию «best-in-class» оптимизированных конструкций – бионическом дизайне – (Simulation & Optimization)-Driven Bionic Design, когда получаемые оптимальные инженерные решения (детали, изделия, конструкции и т. д.) напоминают структуры, встречающиеся в живой природе. Уже сейчас применение этого подхода наблюдается в наиболее наукоемких отраслях промышленности – автомобилестроении и производстве авиационной и космической техники мировыми лидерами (Engineering + Design AG, Mercedes, Airbus, Lockheed Martin и др.), для которых достижение таких характеристик, как минимальный вес при удовлетворении высоких требований по жесткости, устойчивости, вибрациям, прочности, усталости и долговечности, является критически важным.

В условиях глобализации рынков, конкуренции, стремительного развития технологий и наукоемких инноваций, появления сверхсложных научно-технических задач-вызовов целесообразно сосредоточить усилия на том, чтобы переосмыслить подходы к проектированию и созданию глобально конкурентоспособной и востребованной продукции за счет развития передовых производственных технологий и использования бионического дизайна в отраслях отечественной промышленности. В России имеются заделы мирового уровня, в первую очередь в области математического моделирования и разработки новых материалов, которые могут быть основой для создания новых оптимальных конструкций, легких, прочных и надежных изделий.

Развитие и поддержка передовых производственных технологий (в первую очередь таких направлений, как цифровое моделирование и проектирование, разработка новых материалов, аддитивные технологии) в рамках существующих государственных программ (пилотный проект Минпромторга и Минобрнауки России по созданию и развитию инжиниринговых центров на базе ведущих технических университетов; создание региональных центров инжиниринга при поддержке Минэкономразвития России; федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России 2014–2020 гг.»; государственная программа Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» и др.) позволит отечественной промышленности перейти на качественно новый технологический уровень и занять лидирующие позиции на мировых рынках.

С целью повышения готовности России к технологическому будущему Президент РФ В.В. Путин в своем Послании Федеральному Собранию от 4 декабря 2014 г. заявил о Национальной технологической инициативе (НТИ) как широком коалиционном действии проектных творческих команд и динамически развивающихся отечественных компаний, ориентированных на передовые технологические разработки. В формирование проектных консорциумов должны быть вовлечены ведущие университеты, исследовательские и инжиниринговые центры, академические институты, институты развития и предприятия высокотехнологичной промышленности.

Фактически НТИ – это долгосрочная межведомственная программа частно-государственного партнерства по содействию развитию новых перспективных рынков на базе высокотехнологичных решений, которые будут определять развитие мировой и российской экономики в 2030–2035 гг.

В мае 2015 г. в рамках «Форсайт-Флота», проведенного по инициативе АНО «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов», в котором приняли участие более 700 человек (включая одного из авторов настоящей работы), в качестве перспективных и важных для экономического и технологического развития России были выделены (см. рис. 5):

- рынки: AeroNet, AutoNet, MariNet, EnergyNet, SafeNet, NeuroNet, FoodNet, HealthNet, FinNet;
- технологии: цифровое моделирование и проектирование, новые материалы, аддитивные технологии, бионика и мехабиотроника, сенсорные системы, искусственный интеллект и системы управления, Big Data, квантовые коммуникации, новые источники энергии, новая элементная база в микроэлектронике, геномика и синтетическая биология.

При этом, с точки зрения Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ, именно цифровое моделирование и проектирование (включая бионический дизайн, компьютерный / суперкомпьютерный инжиниринг и технологии оптимизации), новые материалы и аддитивные технологии являются ядром для формирования «фабрик будущего» (Factories of the Future) – Digital / Smart / Virtual Factory.

Далее, из таких «цифровых производств» может быть сформирована распределенная сеть DigitalFactory.Net, которая в свою очередь выступит «кровеносной системой» для основных рынков будущего, указанных в Национальной технологической инициативе. Смежными технологиями, важными для движения в сторону Digital Factory, выступают бионика, мехабиотроника и робототехника; в сторону Smart / Virtual Factory – сенсорика, системы управления, Big Data, индустриальный интернет и другие передовые технологии.

Учитывая вышесказанное, можно привести символические формулы передовых производственных технологий (в первом и втором приближении):

ППТ⁽¹⁾ = передовые материалы & цифровое моделирование и проектирование, включая бионический дизайн, суперкомпьютерный инжиниринг и оптимизация & аддитивные и гибридные технологии;

ППТ⁽²⁾ = передовые материалы & цифровое моделирование и проектирование, включая бионический дизайн, суперкомпьютерный инжиниринг и оптимизация & аддитивные и гибридные технологии, робототехника, сенсорика, системы управления, Big Data, индустриальный интернет.

Авторы настоящей работы отводят бионическому дизайну одно из ключевых мест в развитии и эффективном применении передовых производственных технологий для создания глобально конкурентоспособной продукции нового поколения, в частности представленной на новых рынках (Aero & Auto & Mari & Engine &...).Net.

Естественно, за ППТ⁽¹⁾ и ППТ⁽²⁾ последуют и другие уточнения и дополнения – ППТ⁽³⁾, ППТ⁽⁴⁾..., – связанные в первую очередь с формированием Digital / Smart / Virtual Factory, затем – с формированием (Digital / Smart / Virtual)-Factory.Net, созданием высокотехнологичной продукции нового поколения и формированием новых рынков высококастомизированной продукции.

В этом смысле Институт передовых производственных технологий СПбПУ – это фактически полигон Digital / Smart / Virtual Factory, а главные рынки будущего, на которых он будет работать, – AutoNet, AeroNet, EngineNet и другие.

Список литературы

1. *Княгинин В.Н.* Модульная революция: распространение модульного дизайна и эпоха модульных платформ / под ред. М.С. Липецкой, С.А. Шмелевой. – СПб., 2013. – 80 с.
2. Современное инженерное образование / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин, М.П. Мельникова, В.А. Пальмов, Е.Н. Силина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 80 с.
3. Компьютерный инжиниринг / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин, М.П. Мельникова, А.А. Михайлов, А.С. Немов, В.А. Пальмов, Е.Н. Силина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.
4. *Княгинин В.Н.* Промышленный дизайн Российской Федерации: возможность преодоления «дизайн-барьера» / под ред. М.С. Липецкой, С.А. Шмелевой. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 80 с.
5. *Батоврин В.К.* Стандарты системной инженерии / под ред. М.С. Липецкой, К.А. Ивановой. – СПб., 2012. – 64 с.
6. *Батоврин В.К., Бахтурин Д.А.* Управление жизненным циклом технических систем / под ред. И.С. Мацкевича, М.С. Липецкой. – СПб., 2012. – 59 с.
7. «Умные» среды, «умные» системы, «умные» производства / М.Э. Аким, И.Б. Андреев, Н.С. Андреева, А.С. Коноваленков, С.А. Шмелева; под ред. М.С. Липецкой, Ю.А. Рябова. – СПб., 2012. – 62 с.
8. *Фейгенсон Н.Б., Мацкевич И.С., Липецкая М.С.* Бережливое производство и системы менеджмента качества. – СПб., 2012. – 71 с.
9. План мероприятий («дорожная карта») в области инжиниринга и промышленного дизайна: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 июля 2013 г. № 1300-р. – URL: <http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/1300-r.pdf> (дата обращения: 15.06.2015).
10. Государственная программа Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»: утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 328. – URL: <http://government.ru/media/files/1gqVAlrW8Nw.pdf> (дата обращения: 26.05.2015).
11. *Боровков А.И.* Цели создания Ассоциации инжиниринговых центров России: выступление на форуме «Экосистема инноваций: университеты и научные центры» (Москва, 12–13 марта 2015 г.)
12. Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ Петра Великого - абсолютный лидер среди инжиниринговых центров России, созданных на базе ведущих технических университетов. – URL: <http://fea.ru/news/6155> (дата обращения: 01.05.2015).
13. Министр промышленности и торговли РФ Д.В. Мантуров и министр образования и науки РФ Д.В. Ливанов посетили передовой российский Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ. – URL: <http://fea.ru/news/6050> (дата обращения: 23.01.2015).

14. Министры обсудили в СПбПУ развитие инжиниринговых центров, созданных на базе ведущих технических вузов. – URL: https://www.spbstu.ru/media/news/education/ministry_obsudili_v_spbpu_razvitie_inzhiniringovykh_tsentrov_sozdannyykh_na_baze_vedushchikh_tekhnich/?sphrase_id=8366 (дата обращения: 23.01.2015).
15. Пастухов В.А. Итоги реализации проектов создания и развития инжиниринговых центров на базе образовательных организаций высшего образования в 2014 году: выступление на совещании по теме «Реализация пилотного проекта по созданию и развитию инжиниринговых центров, создаваемых на базе образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России» (Москва, 27 марта 2015 г.).
16. Дежина И.Г. Передовые производственные технологии: место России // Экономическое развитие России. – 2014. – № 2. – С. 42–45.
17. Дежина И.Г., Пономарев А.К., Фролов А.С. Перспективные производственные технологии в России: контуры новой политики // Форсайт. – 2015 – Т. 9, № 1. – С. 20–31.
18. Дежина И.Г., Пономарев А.К. Перспективные производственные технологии: новые акценты в развитии промышленности // Форсайт. – 2014. – Т. 8, № 2. – С. 16–27.
19. Княгинин В.Н. Развитие передовых производственных технологий: новая промышленная революция // Менеджмент инноваций. – 2014. – № 3. – С. 220–231.
20. Ученый совет Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого создал Институт передовых производственных технологий. – URL: <http://fea.ru/news/6089> (дата обращения: 27.02.2015).
21. Боровков А.И. Стратегия государства в вопросах импортозамещения инновационной продукции: выступление на семинаре «Создание условий для ускорения вовлечения в экономический оборот инновационной продукции с целью обеспечения импортозамещения» (Санкт-Петербург, 26 мая 2015 г.).
22. Заседание президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России. О разработке и реализации Национальной технологической инициативы, об инновационном развитии информационных технологий. – URL: <http://government.ru/news/18433/> (дата обращения: 18.06.2015).
23. Песков Д.Н. Национальная технологическая инициатива: цели, основные принципы и достигнутые результаты: доклад на заседании Президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России (Москва, 9 июня 2015 г.). – URL: <http://government.ru/media/files/T9Crayp8PsBQU6hdVAL0SsDlu2XvCvYG.pdf> (дата обращения: 18.06.2015).
24. Боровков А.И. Бионический дизайн, компьютерный инжиниринг и оптимизация ячеистых структур – путь кардинального снижения веса и себестоимости изготовления деталей ГТД: выступление на национальной выставке ВУЗ-ПРОМЭКСПО-2014 (Москва, 29–30 сентября 2014 г.).

25. Положение о проведении открытого публичного конкурса на предоставление государственной поддержки пилотных проектов по созданию и развитию инжиниринговых центров на базе образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации (третья очередь) (шифр конкурса 2015-И-03). – URL: <http://минобрнауки.рф/новости/5392/файл/4280/кд.pdf> (дата обращения: 25.05.2015).
26. Высокотехнологичный компьютерный инжиниринг: обзор рынков и технологий / Э.Р. Абдулбариева, Ю.Я. Болдырев, А.И. Боровков, В.И. Жигалов, К.А. Иванова, В.Н. Княгинин, А.А. Кузнецов, И.И. Ласкина, М.С. Липецкая, В.С. Осьмаков, Ю.Б. Ханьжина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 110 с.
27. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» / И.Г. Дежина, А.К. Пономарев, А.С. Фролов [и др.]; Сколковский институт науки и технологий. – URL: <https://reestr.extech.ru/docs/analytic/reports/new%20technologies2015.pdf> (дата обращения: 19.06.2015).
28. Большая советская энциклопедия: в 30 т. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1970. – Т. 3. – 640 с.
29. Jack Steele Memorial Website. – URL: <http://www.ilasting.com/jacksteele/timeline.php> (дата обращения: 11.03.2015).
30. Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов / под ред. С.В. Калюжного. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 528 с.
31. Biomimetics: Advancing nanobiomaterials and tissue engineering / ed. by M. Ramalingam, Wang Xiumei, Chen Guoping, P. Ma, Cui Fu-Zhai. – Beverley (Mass.): Scrivener Publishing, 2013. – 384 p.
32. Тарантул В.З. Толковый биотехнологический словарь. Русско-английский. – М.: Языки славянских культур, 2009. – 935 с.
33. Benyus J. Biomimicry: Innovation inspired by nature. – New York: William Morrow & Co., 1997. – 308 p.
34. Scobey-Thal J. Biomimetics: A short history. Why imitating nature's tricks is the future of engineering – URL: http://foreignpolicy.com/2014/12/01/biomimetics-a-short-history/?wp_login_redirect=0 (дата обращения: 03.04.2015).
35. Поверхность листа. – URL: <http://www.okms-grh.ru/archives/540> (дата обращения: 03.04.2015).
36. Helms M., Vattam S.S., Goel A.K. Biologically inspired design: Process and products // Design Studies. – 2009. – Vol. 30, Issue 5. – P. 606–622.
37. Speck T., Speck O. Process sequences in biomimetic research // Design and Nature IV / ed. by C. Brebbia. – Southampton: WIT Press, 2008. – P. 3–11.
38. Freitas Salgueiredo C. Modeling biological inspiration for innovative design. – URL: http://www.i-3.fr/wp-content/uploads/2013/04/Freitas__conference132013.pdf (дата обращения: 18.11.2014).

39. *Choi C.Q.* Brute force: Humans can sure take a punch. – URL: <http://www.livescience.com/6040-brute-force-humans-punch.html> (дата обращения: 17.04.2015).
40. *Гуричев А.А.* Кости. От мистики до анатомии. – URL: <http://obiosphere.spb.ru/тело/кости-от-мистики-до-анатомии.html> (дата обращения: 18.04.2015).
41. *Утенькин А.А.* Кость – многоэтажный композит // *Химия и жизнь*. – 1981. – № 4. – С. 38–40.
42. *Бегун П.И., Афонин П.Н.* Моделирование в биомеханике. – М.: Высшая школа, 2004. – 390 с.
43. *Фигурска М.* Структура компактной костной ткани // *Российский журнал биомеханики*. – 2007. – Т. 11, № 3. – С. 28–38.
44. The biomechanical basis of bone strength development during growth / *S.A. Kontulainen, J.M. Hughes, H.M. Macdonald [et al.]* // *Medicine and Sport Science*. – 2007. – Vol. 51. – P. 13–32.
45. *Курепина М.М., Воккен Г.Г.* Анатомия человека. – 4-е изд. – М.: Просвещение, 1979. – 304 с. – URL: <http://anfiz.ru/books/item/f00/s00/z0000012/index.shtml> (дата обращения: 18.04.2015).
46. *Цехмистренко Т.А.* Развитие и строение скелета: лекция / *Росс. ун-т дружбы народов, каф. анатомии человека*. – URL: http://rb03.twirpx.net/0834/0834543_99F0989B/razvitie_i_stroenie_skeleta.pdf (дата обращения: 18.04.2015).
47. Рост костей. – URL: <http://vivmed.ru/content/rost-kostey.html> (дата обращения: 15.06.2015).
48. *Choi C.Q.* Bone density drop in modern humans linked to less physical activity. – URL: <http://www.livescience.com/49236-bone-density-human-evolution.html> (дата обращения: 16.04.2015).
49. *Okruta M.* Three-dimensional topology optimization of statically loaded porous and multi-phase structures / *University of Rhode Island*. – URL: <http://digitalcommons.uri.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1349&context=theses> (дата обращения: 04.01.2015).
50. *Hassani B., Hinton E.* Homogenization and structural topology optimization: Theory, practice and software. – London: Springer, 1999. – 293 p.
51. *Johnsen S.* Structural topology optimization: Basic theory, methods and applications / *Norwegian University of Science and Technology*. – URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:648664/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 04.01.2015).
52. *Bendsøe M.P., Sigmund O.* Topology optimization: Theory, methods and applications. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2003. – 392 p.
53. Optimization intro. – URL: <http://training.altairuniversity.com/optimization/optimization-intro/> (дата обращения: 20.04.2015).

54. Комаров В.А., Кузнецов А.С. Выбор облика летательного аппарата с использованием технологии многодисциплинарной оптимизации / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2012. – 76 с. – URL: http://www.ssau.ru/files/education/uch_posob/Выбор%20облика-Комаров%20ВА.pdf (дата обращения: 26.04.2015).
55. Mattheck C. Design in nature: Learning from trees. – Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. – 280 p.
56. Становление и развитие классической теории описания структуры костной ткани / А.А. Киченко, В.М. Тверье, Ю.И. Няшин [и др.] // Российский журнал биомеханики. – 2008. – Т. 12, № 1. – С. 69–89.
57. McKeag T. Shape means strength, from a Boeing Dreamliner to a bone chair. – URL: <http://www.greenbiz.com/blog/2014/08/05/how-nature-inspires-us-save-resources-shape-optimization> (дата обращения: 07.04.2015).
58. Brennan J. 20 years of topology optimization: Birth and maturation of a disruptive technology. – URL: <http://insider.altairhyperworks.com/20-years-topology-optimization-birth-maturation-disruptive-technology/> (дата обращения: 07.04.2015).
59. Gibson L.J., Ashby M.F. Cellular solids: Structure and properties. – 2nd edition. – Cambridge: Cambridge University Press, 1997. – 532 p.
60. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials / Zheng Xiaoyu, Lee Howon, T. Weisgraber [et al.] // Science. – 2014. – Vol. 344, Issue 6190. – P. 1373–1377.
61. Fleck N.A., Deshpande V.S., Ashby M.F. Micro-architected materials: Past, present and future // Proceedings of the Royal Society A. – 2010. – Vol. 466, Issue 2121. – P. 2495–2516.
62. Simulia Tosca structure: The structural optimization system. – URL: http://www.fe-design.de/fileadmin/FE_DESIGN/produkte/SIMULIA_Tosca_Structure_Brochure.pdf (дата обращения: 21.04.2015).
63. Simulia Tosca fluid design and optimization for fluid flow systems. – URL: http://www.fe-design.de/fileadmin/FE_DESIGN/produkte/SIMULIA_Tosca_Fluid_Brochure.pdf (дата обращения: 21.04.2015).
64. Новости компьютерного инжиниринга. Лучшие компьютерные технологии топологической оптимизации и промышленного дизайна - solidThinking Inspire и Evolve - в России! Американская фирма-разработчик SOLIDTHINKING, Inc. и CompMechLab® заключили договор о сотрудничестве. – URL: <http://fea.ru/news/6026> (дата обращения: 05.01.2015).
65. Williams C.B., Mistree F., Rosen D.W. Investigation of solid freeform fabrication processes for the manufacture of parts with designed mesostructure // Proceedings of the DETC'05: ASME 2005 Design Engineering Technical Conferences and Computer and Information in Engineering Conference. September 24–28, 2005. – URL: http://www.researchgate.net/publication/246537404_INVESTIGATION_OF_SOLID_FREEFORM_FABRICATION_PROCESSES_FOR_THE_MANUFACTURE_OF_PARTS_WITH_DESIGNED_MESOSTRUCTURE (дата обращения: 08.04.2015).

66. Collapse mechanism maps for a hollow pyramidal lattice / S.M. Pingle, N.A. Fleck, V.S. Deshpande [et al.] // Proceedings of the Royal Society A. – 2011. – Vol. 467, Issue 2128. – P. 985–1011.
67. *Banhart J., Weaire D.* On the road again: Metal foams find favor // Physics Today. – 2002. – Vol. 55, Issue 7. – P. 37–42.
68. *Williams C.B.* Design and development of a layer-based additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructure: a dissertation presented to the academic faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree doctor of philosophy in mechanical engineering / Georgia Institute of Technology. – URL: https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/22687/Williams_Christopher_B_200804_phd.pdf?sequence=1 (дата обращения: 08.12.2014).
69. *Зленко М., Забеднов П.* Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Технологии литья металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм. – URL: http://ksystec.ru/download/additiv_tech.pdf (дата обращения: 10.04.2015).
70. *Anderson S.* Rolls-Royce to get largest-ever 3D printed component off the ground, flight-testing engine later this year. – URL: <http://3dprint.com/45820/rolls-royce-largest-3d-printed/> (дата обращения: 15.03.2015).
71. Why the composites industry will be excited about a carbon fiber 3D printer. – URL: <https://gigaom.com/2014/02/20/why-the-composites-industry-will-be-excited-about-a-carbon-fiber-3d-printer/> (дата обращения: 01.02.2015).
72. Carbon3D introduces breakthrough CLIP technology for layerless 3D printing, 25-100x faster. – URL: <http://www.3ders.org/articles/20150317-carbon3d-introduces-breakthrough-clip-technology-for-layerless-3d-printing.html> (дата обращения: 22.03.2015).
73. Новости компьютерного инжиниринга. Бионический дизайн. Компьютерная технология топологической оптимизации Altair® OptiStruct® революционно изменяет процесс разработки ячеистых/решетчатых структур для аддитивного производства (3D печати). – URL: <http://fea.ru/news/6156> (дата обращения: 02.05.2015).
74. Simpleware software for lattice structure generation. – URL: <https://54a789561c7826ffd9a9-cceab7aecbf1bba529b4eb1bb637d0e4.ssl.cf3.rackcdn.com/Simpleware%20for%20Lattices.pdf> (дата обращения: 02.05.2015).
75. Material and geotechnical applications: Part with internal lattice structure added in Simpleware module ScanIP. – URL: <https://www.pinterest.com/simplewareltd/material-and-geotechnical-applications/> (дата обращения: 02.05.2015).
76. Новости мирового автопрома. Опубликован «Индекс электромобильности». Проектирование всё более легких конструкций в автопромышленности может стимулировать развитие электромобилей. – URL: <http://fea.ru/news/6149> (дата обращения: 23.04.2015).
77. Additive manufacturing opportunities in the aerospace industry: A ten-year forecast. – Charlottesville (Va.): SmarTech Markets Publishing, 2014. – 129 p.

78. Combining topology optimization with laser additive manufacturing reveals new potential for lightweight structures. – URL: [http://www.altairhyperworks.com/\(S\(ni0nvezp110gyope5s0bdjx5\)\)/ResLibDownload.aspx?file_id=3721&from=ResourceLibrary.aspx?keywords=Combining+topology+optimization+with+laser+additive+manufacturing+reveals+new+potential+for+lightweight+structures](http://www.altairhyperworks.com/(S(ni0nvezp110gyope5s0bdjx5))/ResLibDownload.aspx?file_id=3721&from=ResourceLibrary.aspx?keywords=Combining+topology+optimization+with+laser+additive+manufacturing+reveals+new+potential+for+lightweight+structures) (дата обращения: 06.03.2015).
79. Supermaterial with the weight and density of aerogel but 10,000 times the stiffness and enabling super solar sails in the 2030-2040 timeframe. – URL: <http://nextbigfuture.com/2014/06/supermaterial-with-weight-and-density.html> (дата обращения: 05.04.2015).
80. Lawrence Livermore, MIT researchers develop new ultralight, ultrastiff 3D printed materials. – URL: <https://www.llnl.gov/news/lawrence-livermore-mit-researchers-develop-new-ultralight-ultrastiff-3d-printed-materials#.U6TPg0AmydB> (дата обращения: 05.04.2015).
81. *Cheung K.C., Gershenfeld N.* Reversibly assembled cellular composite materials // *Science*. – 2013. – Vol. 341, Issue 6151. – P. 1219–1221.
82. *Chandler D.L.* How to make big things out of small pieces. Researchers invent a new approach to assembling big structures – even airplanes and bridges – out of small interlocking composite components. – URL: <http://newsoffice.mit.edu/2013/how-to-make-big-things-out-of-small-pieces-0815> (дата обращения: 12.05.2015).
83. New approach assembles big structures from small interlocking pieces. – URL: <http://www.sciencedaily.com/releases/2013/08/130815145151.htm> (дата обращения: 12.05.2015).
84. Laser additive manufacturing and bionics: Redefining lightweight design / C. Emmelmann, P. Sander, J. Kranz [et al.] // *Physics Procedia*. – 2011. – Vol. 12, Part A. – P. 364–368.
85. Concept Laser technology trendsetter. Aerospace. Ahead! Topologically optimised components in aviation. – URL: http://www.concept-laser.de/fileadmin/downloads_allg/101026_aerospace_DE_EN_lowres.pdf (дата обращения: 17.05.2015).
86. Concept Laser technology trendsetter. Automotive. Fast! Direct components in vehicle construction. – URL: http://www.concept-laser.de/fileadmin/downloads_allg/101026_automotive_DE_EN_lowres.pdf (дата обращения: 17.05.2015).
87. *Kranz J., Herzog D., Emmelmann D.* Laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4: A design for manufacturing approach. – URL: <http://www.slideshare.net/AltairHTC/s04-lzn> (дата обращения: 15.05.2015).
88. *Krishnakumar V.* Biomimetic architecture: School of Planning and Architecture seminar 2011-2012. – URL: <http://www.slideshare.net/vaisalik/biomimetic-architecture> (дата обращения: 28.04.2015).
89. *Сайкина Ю.А., Соколов А.П.* Взаимодействие бионики и дизайна // *Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 9–13 апреля 2012 г.): в 3 т.* – 2012. – Т. 3. – URL: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2012/C2/V3/v3_148.pdf (дата обращения: 03.05.2015).

90. Лексина О.И. Линейчатые поверхности как конструктивное, функциональное и художественное средство в архитектуре Гауди // Архитектура и современные информационные технологии. – 2014. – № 3 (28). – URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2014/3kvart14/leksina/leksina.pdf> (дата обращения: 10.04.2015).
91. Barcelona's natural wonder. – URL: <http://www.sagradafamilia.cat/sfup/prensa/2010-09-01-01.pdf> (дата обращения: 10.04.2015).
92. Гридюшко А.Д., Чентемирова Е.Г. Биомиметические принципы формообразования вертикальных ферм как новой типологии в агропромышленной архитектуре // Архитектура и современные информационные технологии. – 2013. – № 4 (25). – URL: www.marhi.ru/AMIT/2013/4kvart13/gridushko/gridushko.pdf (дата обращения: 15.04.2015).
93. Hu Nan, Feng Peng, Dai Gonglian. The gift from nature: Bio-inspired strategy for developing innovative bridges // Journal of Bionic Engineering. – 2013. – Vol. 10, Issue 4. – P. 405–414.
94. Биомиметика. Учимся у природы. – URL: <http://blogs.pcmag.ru/node/218> (дата обращения: 22.04.2015).
95. Vincent J.F.V. Stealing ideas from nature // Deployable structure / ed. by S. Pellegrino. – Vienna: Springer, 2001. – P. 51–58.
96. A station shaped like an anteater. – URL: <http://kateshrewsday.com/2012/09/25/zoomorphian-dreamscapes/> (дата обращения: 28.04.2015).
97. International Terminal Waterloo, London, UK. – URL: <http://grimshaw-architects.com/project/international-terminal-waterloo/> (дата обращения: 25.04.2015).
98. MacRobert award // Ingenia. – 2009. – Issue 39. – URL: <http://www.ingenia.org.uk/ingenia/issues/issue39/macrobot.pdf> (дата обращения: 14.04.2015).
99. Bionic tower. – URL: <http://www.l-a-v-a.net/projects/bionic-tower/> (дата обращения: 08.04.2015).
100. Tsavdaridis K.D., Kingman J.J., Toropov V.V. Applications of topology optimisation in structural engineering: High-rise buildings & steel components. – URL: [http://eprints.whiterose.ac.uk/80988/1/paper%20\(white%20rose\).pdf](http://eprints.whiterose.ac.uk/80988/1/paper%20(white%20rose).pdf) (дата обращения: 20.04.2015).
101. Tsavdaridis K.D., Kingman J. J., Toropov V.V. Applications of topology optimisation in structural engineering: High-rise buildings & steel components. – URL: http://www.researchgate.net/profile/Konstantinos_Tsavdaridis/publication/266851087_Applications_of_Topology_Optimisation_in_Structural_Engineering_High-rise_Buildings__Steel_Components/links/545cfcd00cf27487b44d471e.pdf (дата обращения: 10.04.2015).
102. Bone based software improves how we design from detergent to tanks. – URL: <http://www.forbes.com/sites/alexkonrad/2013/02/13/bone-based-software-improves-how-we-design-from-detergent-to-tanks/> (дата обращения: 13.04.2015).
103. Basantani M. William McDonough's treescraper tower of tomorrow. – URL: <http://inhabitat.com/the-building-of-tomorrow-that-works-like-a-tree/> (дата обращения: 17.04.2015).

104. Design probes - downloads - off the grid: Sustainable habitat 2020. – URL: http://www.design.philips.com/philips/sites/philipsdesign/about/design/imagebank/sustainable_habitat.page (дата обращения: 17.04.2015).
105. LaBarre S. Life on the edge: Four visions for inhabiting a world transformed by climate change. – URL: <http://www.popsci.com/environment/article/2010-09/life-edge> (дата обращения: 17.04.2015).
106. D-Shape: Freeform architectural 3D printing. – URL: <http://www.biomimetic-architecture.com/2012/d-shape-freeform-architectural-3d-printing/> (дата обращения: 10.04.2015).
107. 3D-принтер D-Shape может печатать полноразмерные дома. – URL: <http://www.km.ru/tehnologii/2012/03/11/tehnologii-i-resheniya/3d-printer-d-shape-mozhet-pechatat-polnorazmernye-dom> (дата обращения: 29.04.2015).
108. How big is the biggest freeform 3D architecture print? This big. – URL: <http://www.solidsmack.com/fabrication/enrico-dini-big-freeform-architecture-3d-print-sardinia-villa-rocce/> (дата обращения: 16.04.2015).
109. Как распечатать дачу на 3D-принтере. – URL: http://bg.ru/technology/kak_raspechatat_sebe_dachu_na_3d_printere-21963/ (дата обращения: 29.04.2015).
110. Энрико Дини печатает коралловые рифы, чтобы предотвратить береговую эрозию. – URL: <http://3dtoday.ru/industry/enriko-dini-pechataet-korallovye-rify-chtoby-predotvratit-beregovuyu-eroziyu.html> (дата обращения: 29.04.2015).
111. Pelovitz J. Modeling for industrial design. – URL: <http://jordanelovitz.com/?p=775> (дата обращения: 13.04.2015).
112. Ведущие дизайнеры Голливуда назвали solidThinking Evolve передовым инструментом моделирования, наиболее полно отвечающим их запросам. – URL: <http://fea.ru/news/6048> (дата обращения: 16.04.2015).
113. Use of solidThinking Inspire® revolutionizes the additive manufacturing design process for the world's first 3D printed bike frame. – URL: http://www.altair.com/newsdetail.aspx?news_id=10983&news_country=en-US (дата обращения: 01.04.2015).
114. First metal 3D-printed bicycle frame manufactured by Renishaw for Empire Cycles. – URL: <http://additivemanufacturing.com/2014/03/20/first-metal-3d-printed-bicycle-frame-manufactured-by-renishaw-for-empire-cycles/> (дата обращения: 03.04.2015).
115. Хижняк Н. Напечатана первая в мире велосипедная рама из титана. – URL: <http://hi-news.ru/technology/napечатana-pervaya-v-mire-velosipednaya-rama-iz-titana.html> (дата обращения: 03.04.2015).
116. New Balance использует 3D печать для изготовления персональных кроссовок с шипами. – URL: <http://www.novostiit.net/new-balance-ispolzuet-3d-pechat-dlya-izgotovleniya-personalnyih-krossovok-s-shipami-00019783> (дата обращения: 06.04.2015).

117. Lifestyle-Products: New Balance - improved runner performance with EOS industrial 3D-printing technology. – URL: http://www.eos.info/case_studies/eos-industrial-3D-printing-technology-for-runners-shoes (дата обращения: 06.04.2015).
118. 3D printed sneaker 'FUTURE' wins Silver Award at Global Footwear Design Competition. – URL: <http://www.3ders.org/articles/20150424-3d-printed-sneaker-wins-silver-award-at-global-footwear-design-competition.html> (дата обращения: 27.04.2015).
119. Итальянский дизайнер презентовала коллекцию 3D-печатной обуви и аксессуаров. – URL: <http://www.vistanews.ru/culture/fashion/4058-italyanskiy-dizayner-prezentovala-kollekciyu-3d-pechatnoy-obuvi-i-aksessuarov.html> (дата обращения: 27.04.2015).
120. Moss R. Crossbeams lets you design and build your own toys. – URL: <http://www.gizmag.com/crossbeams-building-toy/37419/> (дата обращения: 28.04.2015).
121. 676-piece assortment. – URL: <https://crossbeamstoy.com/static/assortments/assortment700.html> (дата обращения: 28.04.2015).
122. CompMechLab® Hi-Tech News. Бионический дизайн. Студенты университета в США построили мини-болид с бионическим корпусом, напечатанным на 3D-принтере, и резиномотором. – URL: <http://fea.ru/news/6095> (дата обращения: 18.05.2015).
123. «Мягкое» 3D печатное кресло Биомимикрия от Лилиан ван Даал. – URL: <http://www.3dindustry.ru/article/2991/> (дата обращения: 29.04.2015).
124. The bionic car project. – URL: <http://www.gizmag.com/go/4133/> (дата обращения: 13.05.2015).
125. [un]grounded architecture research. – URL: <http://ungroundedarchitecture.blogspot.ru/2011/08/soft-kill-option.html> (дата обращения: 13.05.2015).
126. Wert R. Mercedes to exhibit fishy "Bionic Car" concept from 2005 at NY MoMA – URL: <http://jalopnik.com/359028/mercedes-to-exhibit-fishy-bionic-car-concept-from-2005-at-ny-moma> (дата обращения: 13.05.2015).
127. How the "EDAG Genesis" turned the automotive industry upside down. – URL: <http://www.edag.de/en/genesis.html> (дата обращения: 29.04.2015).
128. Hanlon M. EDAG's Genesis: The 3D printed car of the future. – URL: <http://www.gizmag.com/edags-genesis-the-3d-printed-car-of-the-future/31051/> (дата обращения: 29.04.2015).
129. Petrány M. This 3D printed concept is the future of automaking. - URL: <http://jalopnik.com/this-3d-printed-concept-is-the-future-of-automaking-1537068339> (дата обращения: 25.06.2015).
130. "EDAG Light Cocoon": The ultimate in lightweight construction. – URL: <http://www.edag.de/en/edag/news-detail/getarticle/News/detail/edag-light-cocoon-the-ultimate-in-lightweight-construction.html> (дата обращения: 29.04.2015).

131. Edag Light Cocoon, l'auto con scheletro e pelle. – URL: <http://www.corrieredelloSPORT.it/motori/saloni/ginevra/2015/01/19-392584/Edag+Light+Cocoon,+l'auto+con+scheletro+e+pelle> (дата обращения: 29.04.2015).
132. World premiere of the concept car 'EDAG Light Cocoon'. – URL: <http://www.materialica.com/lightweight-design-en/world-premiere-concept-car-edag-light-cocoon/> (дата обращения: 29.04.2015).
133. Light, easy and flexible future for heavy commercial vehicles. – URL: <http://www.edag.de/en/edag/news-detail/getarticle/News/detail/light-easy-and-flexible-future-for-heavy-commercial-vehicles.html> (дата обращения: 29.04.2015).
134. Cadillac Aera concept. – URL: <http://www.carbodydesign.com/2010/10/cadillac-aera-concept/> (дата обращения: 18.05.2015).
135. New "WaterBone" lightweight vehicle design could increase EV battery range. – URL: <http://cleantechnica.com/2015/04/27/new-waterbone-lightweight-vehicle-design-increase-ev-battery-range/> (дата обращения: 14.05.2015).
136. Aerodynamic water droplet with strong lightweight bone structure. – URL: <https://localmotors.com/tovara/aerodynamic-water-droplet-with-strong-lightweight-bone-structure/overview/> (дата обращения: 14.05.2015).
137. Alligatorator. Design of lightweight components & structures. Projects. – URL: http://www.aligatorator.com/p/projects_17.html (дата обращения: 15.05.2015).
138. BMW Mini. – URL: <https://topologyoptimization.wordpress.com/2011/03/17/bmw-mini/> (дата обращения: 18.05.2015).
139. Evolutionary Light Structure Engineering. – URL: http://elise.de/documents/ELiSE_Brochure_web_EN.pdf (дата обращения: 18.05.2015).
140. ELiSE automotive engineering: Bionic rim. – URL: http://www.imare.de/fileadmin/user_upload/Home/Sektion%20IV%20Strukturen/ProductSheets/ProductSheet_Felge_web_EN.pdf (дата обращения: 11.03.2015).
141. ДеянГ Д. Тише, чем летящая пуля. – URL: http://www.origins.org.ua/page.php?id_story=1074#ixzz3Y8YbpwAu (дата обращения: 24.04.2015).
142. Biomimicry - Japanese trains mimic kingfisher. – URL: <http://birdnote.org/show/biomimicry-japanese-trains-mimic-kingfisher> (дата обращения: 24.04.2015).
143. Bionic Opter. – URL: http://www.festo.com/cms/en_corp/13165.htm (дата обращения: 25.04.2015).
144. Festo demonstrates bionic opter dragonfly robot. – URL: <http://www.gizmag.com/festo-robot-dragonfly-bionicopter/26874/> (дата обращения: 25.04.2015).
145. That dragonfly stuff. Photo gallery. – URL: <http://thatdragonflystuff.com/photo-gallery/> (дата обращения: 25.04.2015).

146. Швейцарские ученые разработали робота-саламандру. – URL: <http://news-rbk.ru/media/80674-shveycarskie-uchenye-razrabotali-robota-salamandru.html> (дата обращения: 25.04.2015).
147. Фото огненной саламандры. – URL: http://fotopets.ru/publ/foto_amfibij_mira/foto_salamandr/foto_ognennoj_salamandry/55-1-0-96 (дата обращения: 25.04.2015).
148. Pleurobot – прототип робота-саламандры. – URL: <http://www.innoros.ru/news/foreign/15/03/pleurobot-prototip-robota-salamandry> (дата обращения: 25.04.2015).
149. Joris Laarman's latest 'anti-gravity' 3D printer basically conjures metal out of thin air. – URL: <http://www.core77.com/posts/26474/joris-laarmans-latest-anti-gravity-3d-printer-basically-conjures-metal-out-of-thin-air-26474> (дата обращения: 16.06.2015).
150. Новый 3D-принтер Mataerial. – URL: <http://www.orgprint.com/novosti/3D-printer-Mataerial-brosaet-vyzov-gravitacii> (дата обращения: 16.06.2015).
151. Мх3D-Metal – трехмерный принтер, способный создавать металлические структуры любой сложности. – URL: <http://www.dailytechinfo.org/robots/5663-mx3d-metal-trehmernyy-printer-sposobnyy-sozdavat-metallicheskie-struktury-lyuboy-slozhnosti.html> (дата обращения: 16.06.2015).
152. В Голландии стальной мост через канал прямо на месте напечатают с помощью 3D-принтеров. – URL: <https://tjournal.ru/p/3d-printed-bridge> (дата обращения: 15.06.2015).
153. Ambitious plans by MX3D to 3D print metal bridge modeled by Joris Laarman. – URL: <http://www.designboom.com/technology/mx3d-heijmans-3dprint-bridge-06-14-2015/> (дата обращения: 16.06.2015).
154. Aloemedicus. Ортопедические изделия. – URL: <http://aloemedicus.jimdo.com/из-истории/> (дата обращения: 03.04.2015).
155. Биоэлектроника в 1960 году. Реальность. – URL: <http://anlazz.livejournal.com/23653.html> (дата обращения: 03.04.2015).
156. Титановые лопатки с помощью 3D-принтера. – URL: <http://geektimes.ru/company/smile-хро/blog/249100/> (дата обращения: 14.05.2015).
157. Японские экзоскелеты выходят на мировой рынок. – URL: <http://hi-news.ru/robots/yaponskij-ekzoskelet-hal-vuxodit-na-mirovoj-rynok.html> (дата обращения: 06.04.2015).
158. HULC. – URL: <http://www.lockheedmartin.com/us/products/hulc.html> (дата обращения: 06.04.2015).
159. Компания Raytheon представила экзоскелет XOS 2. – URL: <http://xage.ru/kompaniya-raytheon-predstavila-ekzoskelet-xos-2/> (дата обращения: 06.04.2015).
160. EXOATLET – российский экзоскелет. – URL: <http://www.exoatlet.ru/> (дата обращения: 06.04.2015).

161. Бионическое сердце начнут испытывать на людях уже через три года. – URL: <http://www.popmech.ru/technologies/56126-bionicheskoe-serdtse-nachnut-ispytyvat-na-lyudyakh-uzhe-cherez-tri-goda/> (дата обращения: 07.05.2015).
162. Lessons from the field: The value of interdisciplinary research. – URL: http://www.elsevier.com/__data/assets/pdf_file/0010/249778/ElsevierR-and-DSolutions_The-Value-of-Interdisciplinary-Research_Sharklet.pdf (дата обращения: 25.04.2015).
163. *Hørmann M.* Interview: Anthony Brennan, Sharklet technologies on shark skin surfaces. – URL: <http://hellomaterialsblog.com/2012/09/28/interview-anthony-brennan-sharklet-technologies-on-shark-skin-surfaces/> (дата обращения: 25.04.2015).
164. CompMechLab® Hi-Tech News. Бионический дизайн. В США разрабатывают бионическую броню - для создания защитной системы будущего исследователи изучают принципы строения рыбьей чешуи, змеиной кожи и крыльев бабочки. – URL: <http://fea.ru/news/6111> (дата обращения: 28.04.2015).
165. Next generation armor inspired by animal scales. – URL: <http://www.gizmag.com/next-generation-armor-animal-scales/36050/> (дата обращения: 28.04.2015).
166. Scaling up armor systems. – URL: <http://www.northeastern.edu/news/2015/01/scaling-up-armor-systems/> (дата обращения: 28.04.2015).
167. *Быстров А.В.* Роль бионики в формировании проектной концепции бронированного транспортного средства // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2011. – Вып. 1. – С. 96–101. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/rol-bioniki-v-formirovanii-proektnoy-kontseptsii-bronirovannogo-transportnogo-sredstva> (дата обращения: 07.05.2015).
168. SpiderFab: Architecture for on-orbit construction of kilometer-scale apertures. – URL: https://www.nasa.gov/spacetechniac/2013phasell_hoyt.html#.VT8rWyHtlBd (дата обращения: 28.04.2015).
169. NASA awards funding for automated on-orbit construction with 3D printers. – URL: <http://www.3ders.org/articles/20120913-nasa-awards-funding-for-automated-on-orbit-construction-with-3d-printers.html> (дата обращения: 28.04.2015).
170. Почему паук сам не прилипает к своей паутине? – URL: <http://otvetin.ru/animalrasten/526-почему-паук-сам-не-прилипает-к-своей-паутине.html> (дата обращения: 28.04.2015).
171. Роботы-пауки SpiderFab выходят в космос. – URL: <http://spark.ru/startup/robhunter/blog/8296/roboti-pauki-spiderfab-vihodyat-v-kosmos> (дата обращения: 28.04.2015).
172. Airbus unveils incredible design for a transparent plane. – URL: <http://inhabitat.com/airbus-unveils-their-incredible-design-for-a-transparent-plane/> (дата обращения: 19.05.2015).

**Об Инжиниринговом центре
«Центр компьютерного инжиниринга»
Санкт-Петербургского политехнического университета
Петра Великого**

Основа деятельности Инжинирингового центра – трансдисциплинарный и надотраслевой компьютерный инжиниринг (Computer-Aided Engineering), являющийся фундаментальным принципом и прорывной технологией создания в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной и востребованной продукции нового поколения в высокотехнологичных отраслях экономики, а также ее сопровождения на всех этапах жизненного цикла.

ИЦ «ЦКИ» СПбПУ создан на основе учебно-научной и инновационной лаборатории «Вычислительная механика» СПбПУ (CompMechLab, 1987 г.) при активном участии высокотехнологичной spin-out компании вуза ООО Лаборатория «Вычислительная механика» (CompMechLab®) и start-up компании вуза – малого инновационного предприятия ООО «Политех-Инжиниринг», интегрированных в распределенную и динамично настраиваемую для ответов на глобальные вызовы форсайт-структуру Центра компьютерного инжиниринга СПбПУ.

Специалисты Центра выполняют НИОКР в интересах предприятий различных отраслей промышленности: автомобилестроение; авиастроение (в первую очередь, композиционные материалы и композитные конструкции (структуры); атомная энергетика и атомное машиностроение, термоядерная энергетика (термоядерные реакторы); металлургия; машиностроение (специальное, тяжелое, металлургическое, нефтехимическое и т. д.), двигателестроение, судостроение, ракетно-космическая техника, приборостроение и т. д.

За 1,5 года существования Инжинирингового центра специалисты реализовали 24 проекта по заказу высокотехнологичных компаний, исследовательских институтов и проектов государственного значения. Заказчиками работ Центра стали: ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» / ОАО «Корпорация «Иркут», ГК «Ростех» / ОАО «Объединенная двигателестроительная корпорация» / ОАО «КЛИМОВ», ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и др.

Разработки Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» удостоены высшей награды – Гран-при – конкурса «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в рамках X Петербургской технической ярмарки и XX Международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» 2014 г. В марте 2015 г. в рамках XI Петербургской технической ярмарки (ПТЯ-2015) Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ завоевал специальный приз и пять золотых медалей в конкурсе инновационных проектов. В июне 2015 г. ООО Лаборатория «Вычислительная механика» (CompMechLab®) – высокотехнологичная инжиниринговая spin-out компания СПбПУ, заняла в независимом рейтинге быстрорастущих малых и средних предприятий Санкт-Петербурга и Ленинградской области «Gazelle Бизнеса – 2015» 8-е место (всего оценивалось 72 компании, 11 из которых – стартапы). Прирост оборота в части НИОКР в 2014 г. к 2012 г. составил 280%. ООО «Политех-Инжиниринг» – малое инновационное предприятие (start-up компания СПбПУ), созданное в 2011 г. в соответствии с Федеральным законом от 02.08.2009 г. № 217-ФЗ, заняло в рейтинге «Gazelle Бизнеса – 2015» среди стартапов 2-е место (прирост оборота НИОКР в 2014 г. к 2012 г. составил 1787%). ООО Лаборатория «Вычислительная механика» и ООО «Политех-Инжиниринг» стали единственными компаниями, которые представили научно-исследовательскую и научно-техническую сферу Санкт-Петербурга в рейтинге «Gazelle Бизнеса – 2015».

Основные виды деятельности:

- выполнение НИОКР на регулярной основе по заказам КБ и промышленных предприятий («заказные инновации») с целью обеспечения создания в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной продукции нового поколения и импортозамещения зарубежной продукции;
- компьютерный инжиниринг в научной и инновационной деятельности, промышленности, механике композитов и композитных структур, в меж-, мульти- и трансдисциплинарных задачах;
- мультидисциплинарные исследования (механика деформируемого твердого тела, теплообмен, термомеханика, гидрогазодинамика, механика конструкций с жидкостью / в жидкости, электромагнетизм, электромагнитоупругость, акустика и т. д.);
- подготовка востребованных и глобально конкурентоспособных инженеров нового поколения («инженерно-технологического спецназа»), обладающих компетенциями мирового уровня;
- встраивание в технологические цепочки и производство промышленных компаний мирового уровня (освоение, адаптация и развитие «cutting edge-технологий»), экспорт высокоинтеллектуальных услуг, разработка и трансфер технологических цепочек нового поколения с высокой добавленной стоимостью интеллектуальных ноу-хау в отечественную промышленность («опережающий захват, освоение и применение передовых технологий», которые не представлены в России).

Руководитель Инжинирингового центра: Боровков Алексей Иванович, проректор по перспективным проектам СПбПУ, к.т.н., профессор кафедры «Механика и процессы управления» СПбПУ, член-корреспондент Российской инженерной академии, член Совета по инжинирингу и промышленному дизайну при Министерстве промышленности и торговли РФ

Контактное лицо: Карпов Дмитрий Анатольевич, заместитель директора по корпоративным коммуникациям Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ, тел.: (812) 309-18-88, эл. почта: karpov@compmechlab.com

Адрес организации: 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21, корп. 2

Сайт: <http://fea.ru>

Научное издание

Бионический дизайн

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, Т.2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 03.07.2015. Формат 60х84/8. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,5. Тираж 100. Заказ 1518.1

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного Издательством Политехнического университета,

в Типографии Политехнического университета
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Тел.: (812) 552-77-17, 550-40-14

