Вестник научно-технического развития
Bulletin of Science and Technical Development

Номер 178, 2025г.

DOI: 10.18411/vntr2025-178



Издается с 2007 года

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

Журнал выпускается под научным руководством Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

DOI: 10.18411/vntr2025-178

ОГЛАВЛЕНИЕ № 178, 2025

Ольга Юрьевна Волкова, Данила Денисович Власов, Александр Николаевич Полилов. Развитие принципа «bio-inspired» в науке о материалах-конструкциях ……..**стр. 3 – 19**

Леонид Борисович Матусов. Многокритериальное проектирование параметров машин, как больших механических систем……..**стр. 20 – 26**

Виктор Игоревич Черкунов, Людмила Алексеевна Кузьмина, Анатолий Васильевич Щагин, Владислав Витальевич Дадонов. Получение тонких пленок углерода на пластинах из кремния……... **стр. 27 – 33**

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.


СВИДЕТЕЛЬСТВО
О РЕГИСТРАЦИИ СРЕДСТВА МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

ISSN 2070-6847

DOI: 10.18411/vntr2025-178-1

УДК 620.1+539.3

РАЗВИТИЕ ПРИНЦИПА «BIO-INSPIRED» В НАУКЕ О МАТЕРИАЛАХ-КОНСТРУКЦИЯХ

© Ольга Юрьевна Волкова, Данила Денисович Власов, Александр Николаевич Полилов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
sklemina97@yandex.ru

Аннотация. *Конструкционные материалы прошли длительный путь развития — от природных древесины и камня до высокоэнтропийных сплавов и композитов. Однако современные инженерные задачи требуют от материалов не только легкости, прочности и надёжности, но и способности адаптироваться к сложным условиям эксплуатации конструкций. В статье рассматривается эволюция конструкционных материалов с позиций механики, выделяются ключевые этапы перехода от изотропных к анизотропным системам и рассматриваются перспективы применения биоподобных принципов в проектировании новых материалов. Особое внимание уделено взаимосвязи между структурой, свойствами и условиями эксплуатации материалов, а также значимости подхода «bio-inspired» в решении инженерных задач XXI века.*
Ключевые слова: *конструкционные материалы, bio-inspired, анизотропия, композиты, механика материалов, бионика, природные структуры, криволинейное армирование.*

DEVELOPMENT OF THE "BIO-INSPIRED" PRINCIPLE IN MATERIALS SCIENCE AND STRUCTURAL MECHANICS

© Olga Volkova, Danila Vlasov, Alexander Polilov
Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
sklemina97@yandex.ru

Abstract. *Structural materials have come a long way in development — from natural wood and stone to high-entropy alloys and composites. However, modern engineering tasks require materials not only to be lightweight, durable and reliable, but also to be able to adapt to the complex operating conditions of structures. The article considers the evolution of structural materials from the standpoint of mechanics, highlights the key stages of the transition from isotropic to anisotropic systems and considers the prospects for using biosimilar principles in the design of new materials. Particular attention is paid to the relationship between the structure, properties and operating conditions of materials, as well as the importance of the "bio-inspired" approach in solving engineering problems of the XXI century.*
Key words: *structural materials, bio-inspired, anisotropy, composites, mechanics of materials, bionics, natural structures, curvilinear reinforcement.*

1. Введение. Здания, машины и технические системы, без которых невозможно представить современное общество, создавались на основе достаточно простых физических законов и инженерных решений. Поэтому, обладая необходимыми средствами производства и квалификацией, человек может создать любое спроектированное техническое устройство: велосипед, автомобиль, самолет или космический корабль. Однако, при любом уровне технологического развития человек не сможет «сконструировать» живую собаку, пчелу, паука, бабочку, да чтобы они ещё неограниченное время воспроизводили себя в потомстве. Сложность всех живых существ примерно одинакова – в смысле мощности бесконечных множеств (мощность рациональных чисел равна «всего лишь» мощности натурального ряда). Поэтому до конца познать Природу как объект, более сложный, чем Человек (как её частное проявление), ему не под силу, хотя он к этому будет вечно стремиться. Интересно, что – исторически - в любом направлении научно-технической деятельности наблюдаются две чередующиеся и переплетающиеся тенденции: уход от Природы (попытки усовершенствовать её творения) и возвращение – «вперёд (и назад) к Природе» - с признанием её непознаваемого совершенства.

Примеры. Вместо ног – колесо. Гениальный прогресс! Но потом снова – к шагающим или ползущим машинам, когда нужна абсолютная проходимость вплоть до движения по стене, по стеклу (как муха).

Несомненный прогресс по производительности: палка-копалка, лопата, экскаватор – но наука по-прежнему изучает способы преодоления грунта кротом, насекомыми, червями – так экономичнее. Самолет быстрее птицы или бабочки, но насколько вреднее, шумнее, опасней! А невидимые глазу микронасекомые летают быстрее самолетов – в смысле числа своих размеров, преодолеваемых в единицу времени. И, наконец, компьютеры и искусственный интеллект — но при всей своей вычислительной мощности они характеризуются высокой энергоемкостью. Ведь недаром используют «нейросети», как наиболее экономичное «изобретение» Природы.

И в военной технике – уже не огромные танки, а беспилотные «птички», неостановимый «рой ос» или колонны бронированных «термитов».

Подобные рассуждения о периодическом «обострении» интереса к Природе применимы и к медицине, и к биотехнологиям, и к новым биоподобным композитным материалам. При всём совершенстве и «могуществе» сталей и сплавов приходится признать «непознаваемое» совершенство природных материалов, создаваемых практически без затраты энергии. По сути, только преобразованная энергия Солнца позволяет создать древесину, бамбук, кость, паутину, удельная прочность которых (отнесенная к удельному весу) выше, чем у стали. Всё дело в сложности и многоуровневости природных биологических структур, созданных и усовершенствованных миллионами лет эволюции по принципам, которые люди только начинают понимать. И поэтому современная наука всё чаще обращается к Природе — не только как к источнику вдохновения, но и как к настоящей инженерной школе, проверенной естественным отбором.

За тысячелетия человечество достигло немыслимых вершин, но так и не смогло:

- придумать материал-конструкцию, которая сопротивлялась бы знакопеременному, усталостному нагружению лучше, чем дерево;
- создать материал такой же твердый, прочный и при этом долговечный, как «дуэт» эмали и дентина зуба;
- спроектировать соединение, которое было бы надёжнее соединения ветки со стволом дерева;

- синтезировать полимер, обладающий прочностью и жесткостью кости и при этом способный восстанавливаться при повреждении («самозалечиваться») с сохранением механических характеристик.

Эти и множество других примеров убедительно доказывают: химикам, технологам и инженерам-конструкторам предстоит ещё многому научиться у Природы. Поскольку задачи XXI века требуют от механиков и материаловедов новых, необычных подходов, значимость «bio-inspired» принципов сегодня стремительно возрастает.

Цель данной статьи состоит в обосновании важности изучения и неизбежности применения опыта Природы при создании новых композитных конструкционных материалов.

2. Роль конструкционных материалов в истории цивилизации. Освоенные человеком материалы определяют уровень развития техники, технологий и общества в целом, ведь из материалов сделано абсолютно все, что составляет социальную жизнь человека: элементы инфраструктуры, орудия труда, транспорт и т.д. Развитие цивилизации напрямую связано с развитием конструкционных материалов: их освоение отражено в названиях исторических эпох: каменный, бронзовый и железный века, и каждый такой «век» характеризуется новым уровнем прочности, долговечности и технологичности материалов и конструкций. Конструкционные материалы на протяжении всей истории человечества не просто сопровождали технологический прогресс, но во многом его определяли. Форма зданий, способ ведения войны и даже тип мышления – все это во многом продиктовано свойствами материалов конкретной эпохи. С развитием технологий человек научился изменять структуру материала: обжигать глину, плавить металл, закаливать сталь. Это стало переломным моментом, и конструкционные материалы стали создаваться осознанно, исходя из поставленных инженерных задач. Человек начал использовать тепло и пар для создания механизмов и замены мышечной энергии – тепловой и механической. Появление котельных установок было невозможно без сосудов высокого давления, сделанных из высокопрочной стали [1]. Активно развивалось легирование, появились специальные сплавы под определенные задачи. Высокая прочность и жесткость стали позволяли создавать надежные конструкции. Новые способы термообработки металла повысили его свойства. В промышленности повсеместно стал использоваться высокотехнологичный чугун. Но для ряда новых задач XX века свойств металлов оказалось недостаточно, и надо было в некотором смысле возвращаться к природным материалам.

Вывод: Если разработка металлов и сплавов означала уход от природных материалов, то принципиальные задачи воздухоплавания, освоения космического пространства, задачи биомедицины потребовали возвращение к принципам создания биоподобных композитных материалов.

3. Строительные материалы. Исторически и до наших дней человечество использует при строительстве древесину – в огромных объемах, значительно превышающих объем всех используемых металлов и полимеров. Разумеется, прекрасным строительным материалом служил камень, но он хорошо работает лишь на сжатие, и попытки древних строителей храмов изготавливать работающие на изгиб каменные балки, подобные деревянному брусу, приводили к разрушению из-за развития трещин в зоне растяжения. «Благодаря» этому были придуманы арочные конструкции, различные контрфорсы, создающие в готических храмах условия работы каменных блоков только на сжатие. Интересна также интуитивно понятая необходимость армирования соломой глиняных, саманных кирпичей, до сих пор используемых в Средней Азии в сельском строительства. Столетиями не очень высокие здания и крепостные стены возводили из обожженного кирпича, но с освоением цементных

растворов победил железобетон, использующий направленное армирование, как возвращение к принципам создания биологических материалов-конструкций.

По сложности структуры камень не идет ни в какое сравнение с древесиной, поскольку он не является частью какого-либо живого организма. Под камнем понимается любая горная порода, которая используется в строительстве, но все виды пород обладают примерно одинаковым набором свойств: низкой пористостью, высокой жесткостью и прочностью на сжатие, хорошей обрабатываемостью. Все это сделало камень незаменимым материалом при строительстве зданий, оборонительных сооружений, массивных неподвижных конструкций. Долговечность и климатическая стойкость каменных конструкций (в отличие от древесины) зачастую поражает: до наших дней сохранилось огромное количество древних городов, дорог и арочных мостов, которые не потеряли своей работоспособности [1-3]. Особенность камня как конструкционного материала заключается в его низкой трещиностойкости при растяжении, иначе говоря – в высокой хрупкости. Трещина в каменной конструкции растет стремительно, так как отсутствуют внутренние механизмы, которые могли бы ее затормозить. Это, как и большой вес, снижает применимость горных пород, как конструкционного материала, хотя инженеры-строители научились проектировать каменные конструкции с учетом особенностей материала и создавать надежные плотины и мосты.

Но не только недостатки древесины и камня стали причиной перехода к другим конструкционным материалам - основной причиной стали новые потребности общества. Оседлый образ жизни привел к росту городов, появилась необходимость в строительстве высоких домов. Новые тяжелые механизмы требовали от материалов большей прочности и долговечности. Человек стал создавать конструкции и механизмы со сложной геометрией, которую было все труднее обеспечить классическими методами обработки. Природные материалы не могли уже в привычном виде обеспечить растущие потребности человеческого сообщества, и начался длительный период «царствования» металлов.

А для строительства зданий основным конструкционным материалом стал бетон, представляющий собой соединение цемента, щебня и песка. Простота изготовления и прочность этого материала сделали его незаменимым при строительстве мостов и оборонительных сооружений. Армирование бетона стальными прутьями позволяло ему выдерживать не только сжимающие, но и растягивающие нагрузки, т.е. хорошо работать на изгиб, повторяя высокую изгибную прочность древесины.

Создание крупногабаритных металлических и тяжелых бетонных конструкций, воспринимающими огромные нагрузки, значительно повысило риски при их разрушении, и эпоха стали и бетона характеризуется стремительным развитием науки о сопротивлении материалов и строительной механики. Инженерам было необходимо иметь надежный инструмент для проектирования и расчета ответственных несущих конструкций. Появились разделы науки, изучающие механику разрушения, основы долговечности конструкций.

Интересно отметить, что все созданные человеком сплавы можно считать почти изотропными, и для описания их деформирования используется относительно простая теория упругости, основанная на линейном законе Гука. В то же время древесина или фанера обладают явной анизотропией свойств, и давно разработанная для описания их поведения теория упругости анизотропного тела оказалась вполне применимой для появившихся сравнительно недавно волокнистых композитов [4, 5].

В последние годы в строительстве широко используются полимерные армированные материалы, и большое внимание уделяют технологиям ремонта бетонных конструкций, например, опор, колонн путем обматывания их слоями стеклянной или углеродной ткани, пропитанной полимерной смолой. При этом наряду с природным принципом армирования

используется ещё одно свойство биоматериалов (паутины, древесины) – низкая энергоемкость производства, не требующая ни высоких температур, ни значительных усилий.

Вывод: Природный принцип создания направленно армированных композитных материалов возобладал и в такой важнейшей для человечества отрасли как строительство зданий и сооружений.

4. Металлы и сплавы. С развитием металлургии и строительных технологий в XIX–XX веках произошёл переход к массовому использованию стали и сплавов. Эти материалы стали основой индустриализации, однако вместе с расширением технологических возможностей возникали и новые проблемы: большой вес, коррозия, сложность утилизации, усталостные разрушения.

Строительство крупных заводов, железных дорог, паровых машин, двигателей внутреннего сгорания, станков и механизмов требовало создания большого количества массивных, прочных и долговечных конструкций. Первыми конструкционными материалами этого периода стали чугун и сталь – сплавы железа с углеродом. Развитие технологий и создание специальных доменных и мартеновских печей позволило получать эти металлы в больших объемах с хорошей повторяемостью механических характеристик. Оба сплава имеют прочность значительно выше, чем у древесины, более долговечны, способны работать в условиях сложного напряженного состояния, в то время как древесина эффективна лишь при одноосном нагружении вдоль волокон или при изгибе, и для древесины нерешенными остаются вопросы создания надёжных узлов крепления.

Более хрупкий из-за большого содержания углерода чугун обладает отличными литейными свойствами и меньшей стоимостью, он хорошо подходит для массивных станин, мостовых конструкций и т.п. Сталь характеризуется меньшей хрупкостью и высоким модулем Юнга, допускает горячую и холодную обработку давлением, что сделало ее основным материалом для большинства конструкций и механизмов. Добавление в сталь различных легирующих металлов позволяет принципиально улучшить её характеристики. Например, добавление хрома и никеля значительно увеличивает коррозионную стойкость; вольфрам увеличивает твердость стали и позволяет изготавливать из этого сплава режущие инструменты; добавление марганца улучшает литейные свойства. Появились специальные виды пружинной, рельсовой, подшипниковой и броневой стали, в которых улучшаются определенные свойства, необходимые для конкретной задачи.

Двумя главными недостатками стали являются низкая коррозионная стойкость и высокая плотность. Первый проявляется в процессе ржавления, когда поверхностный слой окисляется и постепенно разрушается. Этот процесс усугубляется воздействием повышенной влажности, температуры, агрессивных химических веществ. Однако различные легирующие добавки, нанесение покрытий на поверхность и лакокрасочные материалы позволяют значительно замедлить процесс коррозии. Высокая плотность стали и чугуна означает низкие удельные прочность и жесткость, и с этим недостатком бороться невозможно. В период развития тяжелого транспорта – поездов, тракторов, кораблей – высокие удельные характеристики не были нужны, но бурное развитие авиации и ракетостроения потребовало совершенно иного подхода. В связи с возникшими задачами появились новые виды конструкционных материалов – легкие сплавы на основе алюминия, магния, лития и титана [1, 2].

На заре самолетостроения главными материалами были бамбук, брезент и древесина, которая обладала достаточной прочностью и низкой плотностью для использования в авиационных конструкциях. Со временем конструкторы стали использовать фанеру (дельта-

древесину) – листы шпона древесины, соединенные в один пакет с помощью клея, и с таким «составом» самолеты прошли Первую мировую войну и 20-е-30-е годы. Затем геополитическая ситуация в мире привела к гонке вооружений, и стало понятно, что использование древесины в самолетостроении ограничивает дальнейшее увеличение скоростных характеристик машин. В то время в СССР были созданы тяжелые стальные бомбардировщики, однако их медлительность, сравнительно небольшая боевая нагрузка и низкая маневренность сделали их крайне уязвимой целью.

В ходе развития авиации возник вопрос о создании материала, более легкого и не менее прочного, чем сталь, хотя бы – по удельной прочности, отнесенной к удельному весу материала (табл. 1).

Таблица 1

Конструкционный материал	Предел прочности, МПа	Плотность, г/см^3	Удельная прочность, км
Сталь Ст3	600	7,8	8
Алюминий Д16Т	400	2,7	15
Титан ВТ-5, ВТ-6	1000	4,5	22
Магний (МЛ5, МЛ10)	300	1,8	17
Углепластик	1500	1,5	100
Стеклопластик	800	1,9	53

По этому показателю алюминиевые сплавы превосходили сталь и хорошо подходили для создания легких и прочных несущих конструкций. На новом этапе покорения неба – при освоении космоса свою популярность получили также титановые и магний-литиевые сплавы, применяемые в 90% конструкций аэрокосмической отрасли. К недостаткам большинства легких сплавов относят сложность их механической обработки и сваривания.

Главное противоречие в совершенствовании стальных конструкций, впервые чётко указанное А. Келли [2], состоит в невозможности повышения прочности сплава без снижения его трещиностойкости. Рост вязкости разрушения связан с образованием пластической зоны у вершины трещины, и рост размеров этой зоны требует снижения предела текучести, а для повышения предела прочности нужно, наоборот, исключать пластическую деформацию. Видимо, один из наиболее реальных путей снятия этого принципиального противоречия состоит в создании неоднородных, слоистых или волокнистых структур, в которых прочность обеспечивается волокнами, а за торможение трещины отвечают слабые границы раздела между компонентами [1, 2, 5-8].

Вывод: Принципиальное противоречие между прочностью и трещиностойкостью не удается разрешить созданием квазиоднородных материалов. Используемая Природой неоднородность структуры в виде чередования прочных и слабых компонентов позволяет снять это противоречие, наряду с принципиальным ростом удельных значений прочности и жесткости полимерных композитов.

5. Полимеры и композиты. Перспективные композиты – это некий синтез Природы и технологии. Первые композиты появились задолго до современных: в глиняные (саманные) кирпичи добавляли солому для прочности и нехрупкости. Идея совмещения материалов развивалась постоянно, примерами служат железобетон, фанера и автомобильные покрышки. Аэрокосмическая отрасль стимулировала создание новых материалов, таких как композиты с металлической и керамической матрицей, для газотурбинных и ракетных двигателей.

Появление полимерных композитов во многом связано с изобретением бакелита в 1907 году (первого синтетического полимера) и с развитием производства различных термопластичных и термореактивных пластиков. Однако пластики имели недостатки – низкую прочность и высокую хрупкость.

История «случайного» возникновения волокнистых композитов связана с открытием английским инженером Аланом Гриффитсом в начале прошлого века масштабного эффекта – резкого роста прочности стеклянных волокон при уменьшении их диаметра, что привело к созданию стеклопластиков. Впоследствии появились угле- и органопластики, обладающие высокой удельной прочностью и жесткостью. Волокнистые композиты напоминают древесину; они имеют неоднородную микроструктуру, анизотропию, непрочное полимерное связующее. Производство композитов подразумевает одновременное создание и материала, и конструкции, что требует специальных технологий, таких как выкладка, намотка, пултрузия, вакуумное формование.

Монослой однонаправленного композита (препрег) обладает самыми лучшими жесткостью и прочностью вдоль укладки волокон. При изменении угла армирования от 0° до 90° (поперек волокон) эти характеристики снижаются, что характерно и для древесины, но при использовании предварительно пропитанных монослоев (препрегов), как и для фанеры, появляется возможность создавать композит с заданными свойствами в виде пакета монослоев с различными углами армирования. Наиболее распространенными стали укладки из четырех ориентаций монослоев [0°/±45°/90°], в частности, двух [0°/90°]=[±45°], и выбирая различные доли слоев с разными ориентациями, можно добиться любого спектра упругих (и прочностных) свойств – от самого анизотропного [0°], до квазиизотропного при равном числе слоёв в четырёх направлениях [5]. Такого же результата можно добиться, используя симметричные пары слоев при укладках вида [±α°/±β°].

Во второй половине XX века началась активная разработка полимерных композитных материалов, обладающих высокой удельной жесткостью (рис. 1) и возможностью правления свойствами для создания конструкций, отвечающих конкретным эксплуатационным требованиям. Конструкционные материалы становятся «инструментом проектирования»: изменяя направления армирования, состав матрицы или пористость, можно управлять жёсткостью, прочностью, сопротивлением удару и даже видами разрушения.

Композиты остаются сравнительно дорогими материалами, и эффективность их применения может быть достигнута, если при этом удается решить принципиальную техническую задачу. Не всегда это только снижение веса, как в военной авиации или в космических конструкциях, когда вывод одного килограмма массы на низкую орбиту оценивается стоимостью порядка 1,5 млн. руб. Важна, например, низкая энергоемкость производства (как в живой Природе), что даёт возможность создания изделий на орбите (космические платформы). Основные эффекты и объекты применения могут быть связаны с высокой коррозионной стойкостью (морские суда), немагнитностью (минные тральщики), радиопрозрачностью (защитные экраны и невидимые для радаров летательные аппараты), высокой запасенной упругой энергией (рессоры, пружины), с биосовместимостью (импланты), т.е. с рядом свойств, которыми традиционные сплавы не обладают.

Вывод: На очередном витке развития науки, техники и технологии происходит рост интереса к биологическим принципам создания композитных материалов-конструкций, позволяющих решать принципиальные технические задачи, нереализуемые с применением традиционных сплавов.

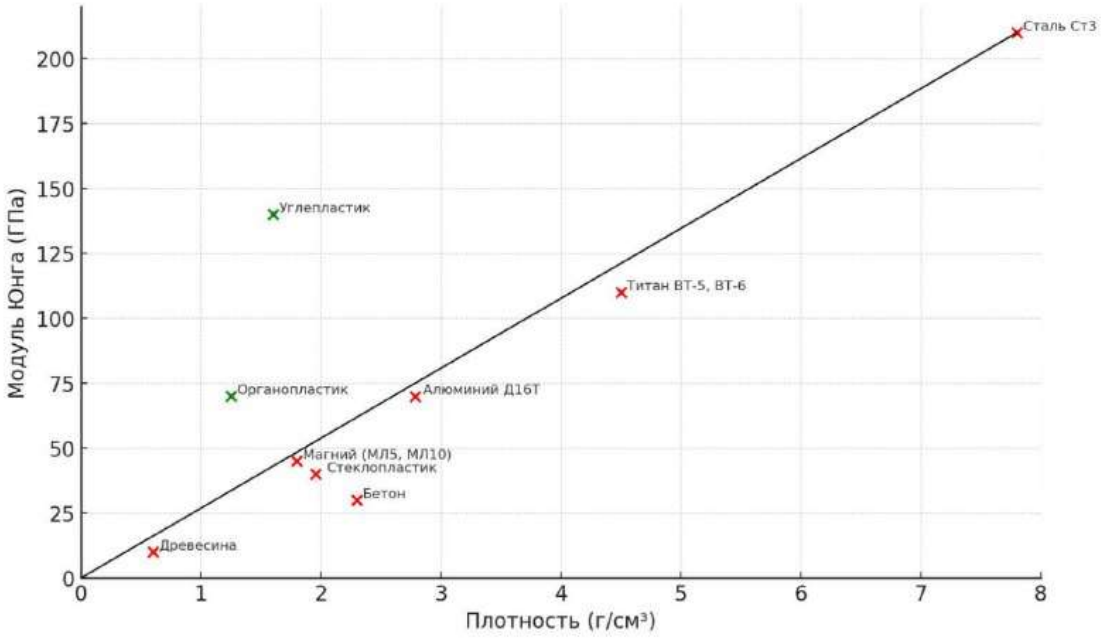


Рис. 1. Удельный модуль упругости (модуль Юнга, отнесенный к удельному весу) разных классов материалов.

6. Примеры и перспективы использования принципа «bio-inspired». Новый этап развития композитных материалов-конструкций характеризуется использованием принципа «подсказано Природой».

6.1. К природным секретам создания прочных и эффективных материалов-конструкций можно отнести неоднородность структуры, наличие непрочных границ раздела, делающих композитные материалы, например, стеклопластик, древесину нечувствительными к трещинам поперек волокон [1, 5, 8]. Схема торможения трещины приведена на рис. 2.

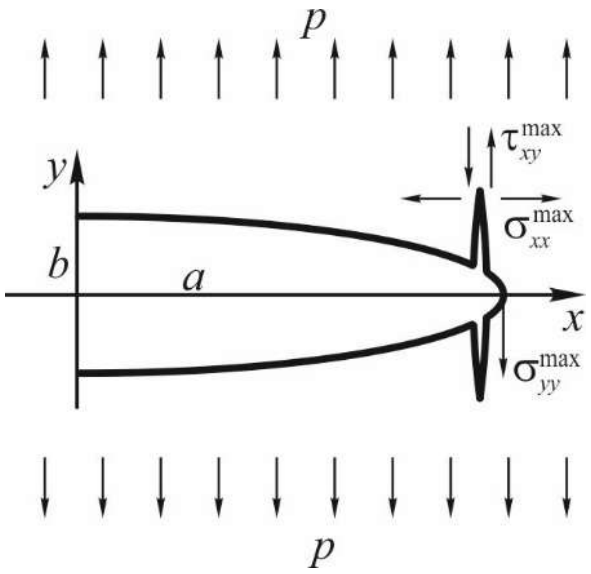


Рис. 2. Механизм торможения трещины за счет расщепления слабой границы раздела «волокно-матрица».

6.2. Для сопротивления расщеплению древесина «использует» свилеватость, малую разориентацию, примерно, 3°-5°, не снижающую продольную прочность [6, 9-10], что эффективно использовать и для однонаправленных углепластиков.

6.3. В Природе, например, в «конструкции» дерева для роста изгибной податливости (чтобы выдерживать ветровые нагрузки) используется равнопрочное профилирование и ветвление (правило Леонардо) [11, 12] (рис. 3), что оказывается эффективным при создании упругих элементов типа листовых пружин, рессор из стеклопластиков [13, 14].

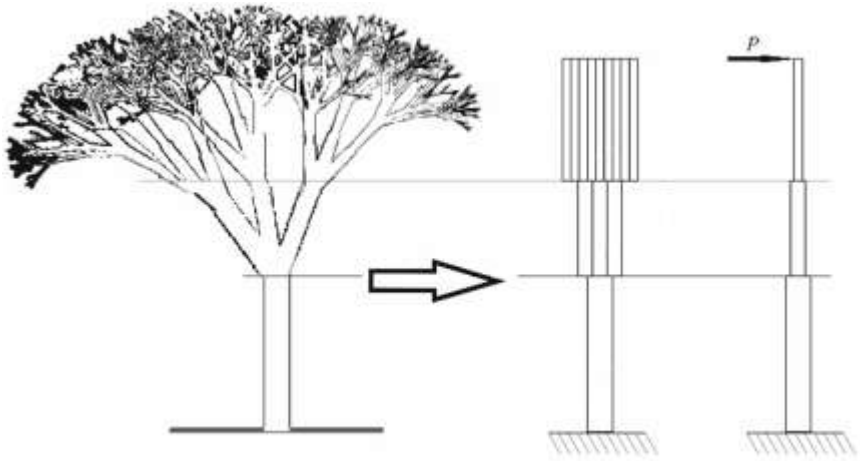


Рис. 3. Модель последовательного ветвления кроны на 3 ветви для максимального роста изгибной податливости с сохранением прочности и суммарной площади сечений ветвей.

6.4. Интересные подсказки для выбора рациональных размеров звеньев композитных трубных конструкций даёт структура бамбука, разрушающегося при сжатии, как и композитные стержни с множественным расщеплением – по форме «китайского фонарика» [15-20] (рис. 4). Условие равенства критических нагрузок для разных видов разрушения позволяет установить рациональные размеры звена для снижения массы конструкции при заданных нагрузках.

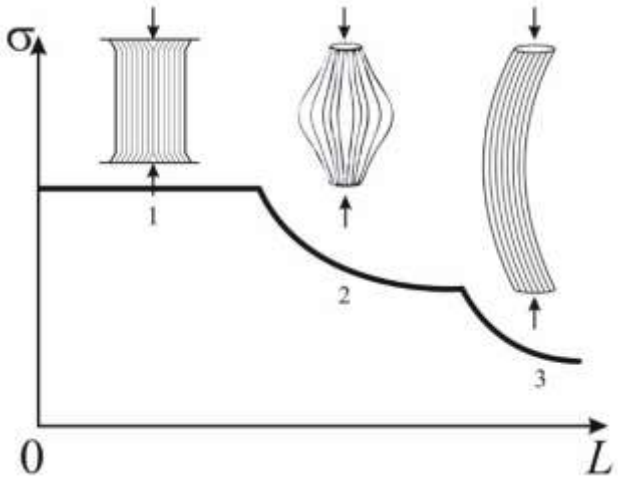


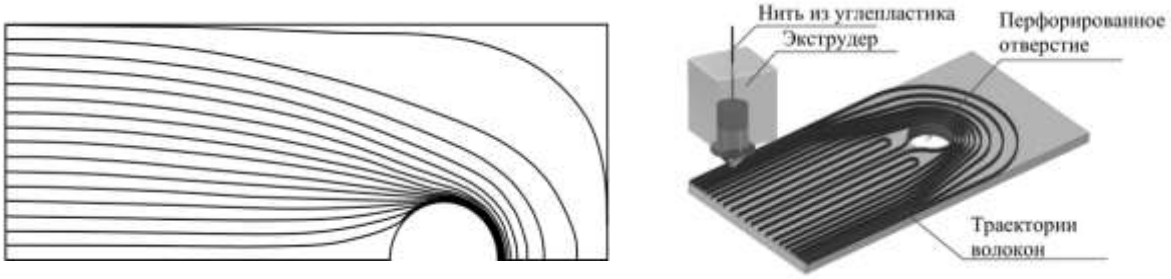
Рис. 4. Различные виды разрушения при сжатии звена бамбука или композитной трубы. 1 – локальное смятие («микроволновое гофрирование»); 2 – «китайский фонарик» (множественное расщепление с выпучиванием образовавшихся полосок); 3 – макропотеря устойчивости (по Эйлеру).

6.5. Природа редко использует прямолинейное армирование, и оно, если и применяется, то в оптимальных направлениях, вдоль действия основных усилий. Но наиболее интересно, как Природа решает задачу соединения элементов, например, крепления ветки к стволу (рис. 5). Ветку можно сломать, но нельзя оторвать от ствола, т.е. разрушить это соединение. Проблема крепления – одна из наиболее сложных в композитном проектировании. Именно в узлах крепления около просверленных отверстий происходит наибольшая потеря прочности, и поэтому такое большое внимание уделяется созданию оптимального криволинейного (био-подобного) армирования в узлах крепления [21-28].

Задачам создания подобных узлов крепления посвящены современные разработки в области аддитивных технологий трехмерной печати [28-31]. В основе нового подхода к проектированию композитных материалов-конструкций лежит создание сложных структур с криволинейным армированием (рис. 6), в которых несущие волокна уложены по оптимальным, рассчитанным из условий нагружения траекториям, близким к траекториям наибольших главных напряжений. Самый очевидный пример подобной структуры – сучок в стволе дерева, и прочность этого соединения выше, чем прочность гладкой древесины, чего человеку не удалось достичь ни в одном типе крепления. Применение подхода «bio-inspired» помогает решить основную проблему волокнистых композитов – низкую несущую способность детали с просверленными отверстиями. «Огибание» волокнами отверстия практически полностью сохраняет прочность соединения (рис. 6).



Рис. 5. Примеры криволинейного армирования в Природе.



а б

Рис. 6. Рассчитанные траектории волокон – а. Схема 3D печати слоя с криволинейным армированием – б.

6.6. Кроме совершенствования геометрии структуры большой интерес вызывают механизмы самовосстановления, свойственного пока только живым материалам, но крайне необходимого для любых несущих конструкций. Не удалось изобрести механизм самовосстановления металлов, но существует возможность создать полимерную структуру, которая частично восстанавливается при возникновении внутренних дефектов. Сегодня известно о трех таких способах: 1) химическая реакция Дильса-Альдера, при которой от

нагревания происходит восстановление полимера; 2) введение в материал капсул с неотвержденным полимером и отвердителем, которые при разрушении капсул смешиваются и частично «залечивают» дефект; 3) облучение полимера ультрафиолетом. Однако эти методы либо сильно снижают прочность полимера, либо являются одноразовыми, либо требуют вмешательства человека, и они пока далеки по сложности и эффективности от природных механизмов.

6.7. Главное отличие природных материалов от синтетических заключается в том, что их структура состоит из многих иерархический уровней: макро-, микро-, нано- и т.д., причем все уровни постоянно взаимодействуют между собой (рис. 7). В существующих композитах можно выделить лишь макро- и микроуровень. Более того, в материалах, созданных Природой, часто сочетаются пористые, слоистые, столбчатые и волокнистые структуры, в то время как человек пока может создать эти структуры лишь обособленно. За счет этого Природные материалы, имея в своем составе лишь ограниченный набор химических элементов, обладают уникальными механическими характеристиками, механизмами защиты от повреждений и способностью самовосстанавливаться [32].



Рис. 7. Иерархическая структура природных материалов.

Важно понять, что современные достижения в композитной области стали возможными благодаря появлению новых технологий и развитию математического аппарата и вычислительных методов компьютерного моделирования неоднородных анизотропных структур. То, о чем человек давно задумывался, но не мог реализовать, он может сделать сейчас, пройдя путь: от Природы – к металлам и бетону – и снова к Природе, но уже с новыми знаниями и технологиями.

Развитие конструкционных материалов отражает не просто технический прогресс, а эволюцию инженерного мышления. От природных структур — камня, дерева, кости, раковин, панцирей — человек перешёл к простым изотропным сплавам, но с усложнением технических задач стало очевидно, что универсальные материалы недостаточно эффективны, и, как в Природе, нужно создавать материалы под конструкции. Современный этап характеризуется возвращением интереса к принципам Природы — теперь уже на новом уровне. «Bio-inspired» подходы позволяют создавать материалы, структура и поведение которых заимствуют идеи из живых систем: криволинейные траектории армирования,

многоуровневая структура, способность к самовосстановлению. При этом инженер получает возможность проектировать материал как «умную структуру» (smart materials) — с заданными характеристиками в разных направлениях и на разных уровнях иерархии. Композиты с криволинейным армированием, адаптивные многослойные структуры и бионические принципы расчета — всё это сегодня становится не только теорией, но и инженерной практикой. А значит – вперёд к Природе.

Вывод: «Чем дольше я занимаюсь композитами, тем больше люблю древесину» [5, 6]. Лозунг известного композитчика С. Цая – «Think composites» (думай композитно) означает не просто разработку конструкционного материала, но создание композитных «материалов-конструкций»: материала под конструкцию и конструкцию - с учетом особенностей материала (анизотропии, неоднородности, криволинейного армирования в узлах крепления, etc).

7. Заключение. Следует указать три наиболее перспективных, на наш взгляд, и связанных между собой направления в механике композитов. Это **технологическая механика, биомеханика прочности** и **компьютерное моделирование оптимальных структур,** которые требуют дальнейших исследований.

Успехи в создании и применении новых конструкционных материалов, армированных волокнами, пленками, усами, микросферами, нанотрубками определяются в большей степени не механикой твердого тела, а **«технологической механикой»** [5, 6, 29] теоретическим обоснованием и отработкой технологических решений. Традиционное армирование тканями или препрегами — это скорее следствие развития текстильной промышленности и существующего технологического оборудования, а не осознанный поиск оптимальных структур. В условиях массового производства конструкторы-композитчики остаются, как правило, в рамках материалов с прямолинейной или цилиндрической (намотка) анизотропией, хотя современные аддитивные технологии позволяют создавать произвольные структуры армирования. Методы крепления композитных деталей: заклепки, болты, клеи - также повторяют опыт работы с металлами и с пластмассами. Попытки учиться у Природы созданию прочных биологических конструкций: корневая система, соединение ветвей со стволом, крепления скелета животных или панциря насекомых пока еще далеки от массовой реализации в технике. Для таких, принципиально новых, решений особенно важна роль **«биомеханики прочности»**, ее перспективной ветви, относящейся к материалам с криволинейной анизотропией и неплоскими поверхностями раздела. Развитие соответствующей теории позволило бы совместно оптимизировать структуру армирования и форму композитных деталей с учетом новых технологических возможностей. И тут заявляет свои права на особое положение сравнительно новое направление **«компьютерного моделирования».** Если для расчета напряженно-деформированного состояния конструкций вариационные методы, реализованные в разнообразных пакетах метода конечных элементов, дают большое преимущество в быстродействии и точности, по сравнению с традиционными аналитическими и экспериментальными методами, то в области моделирования растущих, «живых» материалов возможности компьютерного моделирования поистине незаменимы. Растущая древесина реагирует на внешние воздействия, что не удается учесть традиционными системами уравнений теории анизотропной упругости. Именно компьютер – путем многочисленных переборов – позволяет подобрать рациональную (например, равнонапряженную) структуру волокнистого материала. Это направление как будто специально создано для молодого исследователя. С одной стороны, это чрезвычайно важные космические, авиационные, медицинские, спортивные, строительные, транспортные

перспективы применения композитов. С другой стороны, это глубокая фундаментальная задача познания секретов Природы, гораздо более сложных, чем известные инженерные методы. И, наконец, это также соответствует интересам молодёжи, ориентированной на цифровые технологии и компьютерное моделирование, которые в данном случае становятся не просто удобны, а принципиально необходимы. Оптимальное компьютерное проектирование материалов-конструкций - естественный шаг в научно-техническом прогрессе, и при подготовке специалистов-композитчиков нужно прививать им новые подходы к созданию и расчету композитных деталей, одна из особенностей которых состоит в необходимости комплексных знаний в областях материаловедения, технологии, методов испытаний, расчетов и оптимального проектирования, основанных на механике композитов.

Список литературы

1. Гордон Дж. Почему мы не проваливаемся сквозь пол / пер. с англ. С.Т. Милейко; под ред. Ю.Н. Работнова. — М.: Мир, 1971. — 272 с.
2. Келли А. Высокопрочные материалы / пер. с англ. С.Т. Милейко. — М.: Мир, 1976. — 262 с.
3. Гордон Дж. Конструкции, или почему не ломаются вещи / пер. с англ. В.Д. Эфроса; под ред. С.Т. Милейко. — М.: Мир, 1980. — 390 с.
4. Малинин Н.Н. Надёжность, прочность, красота. — М.: Academia, 2016. — 288 с.
5. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Биомеханика прочности волокнистых композитов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. — 328 с.
6. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Биомеханические принципы оптимального проектирования композитных конструкций // Машиностроение и инженерное образование. – 2018. – № 3(56). – С. 19–26.
7. Полилов А.Н., Власов Д.Д. Механизм торможения трещины непрочной границей раздела // Композиты и наноструктуры. – 2025. – Т. 17, № 1. – С. 35–45. – DOI: 10.36236/1999-7590-2025-17-1-35-45.
8. Полилов А.Н., Малахов А.В., Татусь Н.А., Шабалин В.В. Биомеханические принципы проектирования квазиоднонаправленных композитных структур и мест их крепления // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4, ч. 5. – С. 2427–2430.
9. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Плитов И.С. Оценка влияния разориентации волокон на жёсткость и прочность профилированных композитных элементов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2013. – № 5. – С. 58–67.
10. Полилов А.Н., Плитов И.С., Татусь Н.А. Компьютерное моделирование рациональной структуры криволинейного армирования профилированных композитных элементов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. – № 4. – С. 73–79.
11. Eloy C. Leonardo’s rule, self-similarity and wind-induced stresses in trees // arXiv preprint. – 2011. – arXiv:1105.2591v2 [physics.bio-ph]. – 15 Nov.
12. Inoue A., Kuraoka K., Kitahara F. Mathematical expression for the relationship between internode number and internode length for bamboo, Phyllostachys Pubescens // Journal of Forestry Research. – 2012.–Vol. 23, No. 3. – P. 435–439.DOI: 10.1007/s11676-012-0281-1.

13. Minamino R., Tateno M. Tree branching: Leonardo da Vinci's rule versus biomechanical models // PLOS ONE. – 2014. – Vol. 9, Issue 4. – e9535. – Available at: www.plosone.org (http://www.plosone.org/).
14. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Проектирование разветвляющихся или профилированных композитных элементов по аналогии со структурой кроны дерева // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2017. – № 4. – С. 76–84.
15. Полилов А.Н., Татусь Н.А., Тян Ш., Арутюнова А.С. Равнопрочные ветвящиеся композитные балки с постоянной суммарной площадью переменных эллиптических сечений // Механика композитных материалов. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 465–482.
16. Работнов Ю.Н., Полилов А.Н. О разрушении композитных труб по форме китайского фонарика // Механика композитных материалов. – 1983. – № 3. – С. 548–550.
17. Плитов И.С., Полилов А.Н. Рациональные размеры звена бамбука и композитной трубы, подверженной сжатию, изгибу и кручению // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2015. – № 3. – С. 58–69.
18. Schulgasser K., Witztum A. On the strength of herbaceous vascular plant stems // Annals of Botany. – 1997. – Vol. 80. – P. 35–44. DOI:10.1006/ANBO.1997.0404.
19. Wegst U.G.K., Ashby M.F. The structural efficiency of orthotropic stalks, stems and tubes // Journal of Materials Science. – 2007. – Vol. 42. – P. 9005–9014. DOI: 10.1007/s10853-007-1936-8.
20. Niklas K., Spatz H.-C. Methods for calculating factors of safety for plant stems // The Journal of Experimental Biology. – 1999. – Vol. 202. – P. 3273–3280. DOI: 10.1242/jeb.202.23.3273.
21. Cho H.R., Rowlands R.E. Optimizing fiber direction in perforated orthotropic media to reduce stress concentration // Journal of Composite Materials. – 2009. – Vol. 43, No. 10. – P. 1177–1198. DOI:10.1177/0021998308103608.
22. Huang J., Haftka R.T. Optimization of fiber orientation near a hole for increased load-carrying capacity of composite laminates // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2005. – Vol. 30. – P. 335–341. DOI: 10.1007/s00158-005-0519-z.
23. Spickenheuer A., Schulz M., Gliesche K., Heinrich G. Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures // Plastics, Rubber and Composites – Macromolecular Engineering. – 2008. – Vol. 37, No. 5. – P. 227–232. DOI:10.1179/174328908X309448.
24. Tosh M.W., Kelly D.W. On the design, manufacture and testing of trajectorial fibre steering for carbon fibre composite laminates // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2000. – Vol. 31. – P. 1047–1060. DOI: 10.1016/s1359-835x(00)00063-4.
25. Малахов А.В., Полилов А.Н. Построение траекторий волокон, огибающих отверстие, и их сравнение со структурой древесины в зоне сучка // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2013. – № 4. – С. 57–62.
26. Malakhov A.V., Polilov A.N. Design of composite structures reinforced curvilinear fibres // Composites: Part A. – 2016. – Vol. 87. – P. 23–28. DOI: 10.1016/j. compositesa. 2016.04.005.
27. Sugiyama K., Matsuzaki R., Malakhov A., Polilov A., Ueda M., Todoroki A., Hirano Y. 3D printing of optimized composites with variable fiber volume fraction and stiffness using continuous fiber // Composites Science and Technology. – 2020. – Vol. 186. – 107905. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107905.

28. Hou Z., Tian X., Zhang J., Zhe L., Zheng Z., Li D., Malakhov A.V., Polilov A.N. Design and 3D printing of continuous fiber reinforced heterogeneous composites // Composite Structures. – 2020. – Vol. 237. – 111945. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111945.
29. Малахов А.В., Полилов А.Н., Ли Д., Тян Ш. Увеличение несущей способности композитных пластин в зоне болтового соединения за счёт применения криволинейных траекторий и переменного объёмного содержания волокон // Механика композитных материалов. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 411–428.
30. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Технологическая механика композитов, основанная на изучении опыта природы в создании прочных биологических материалов-конструкций // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2021. – № 1. – С. 59–85. DOI: 10.52261/02346206_2021_1_59.
31. Hou Z., Tian X., Zhang J., Zheng Z., Zhe L., Li D., Malakhov A.V., Polilov A.N. Optimization design and 3D printing of curvilinear fiber reinforced variable stiffness composites // Composites Science and Technology. – 2021. – Vol. 201. – 108502. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108502.
32. Wegst U., Bai H., Saiz E. et al. Bioinspired structural materials // Nature Mater. – 2015. – Vol. 14. – P. 23–36. DOI: 10.1038/nmat4089.

References

1. Gordon J.E. The New Science of Strong Materials: Or Why You Don't Fall through the Floor / Translated from English by S.T. Mileiko; ed. by Yu.N. Rabotnov. – Moscow: Mir, 1971. – 272 p. (in Russian).
2. Kelly A. Strong Solids / Translated from English by S.T. Mileiko. – Moscow: Mir, 1976. – 262 p. (in Russian).
3. Gordon J.E. Structures: Or Why Things Don’t Fall Down / Translated from English by V.D. Efros; ed. by S.T. Mileiko. – Moscow: Mir, 1980. – 390 p. (in Russian).
4. Malinin N.N. Reliability, Strength, Beauty. – Moscow: Academia, 2016. – 288 p. (in Russian).
5. Polilov A.N., Tatus N.A. Biomechanics of Strength in Fibrous Composites. – Moscow: FIZMATLIT, 2018. – 328 p. (in Russian).
6. Polilov A.N., Tatus N.A. Biomechanical principles of optimal design of composite structures // Mechanical Engineering and Engineering Education. – 2018. – No. 3(56). – P. 19–26. (in Russian).
7. Polilov A.N., Vlasov D.D. Mechanism of crack arrest by a weak interfacial boundary // Composites and Nanostructures. – 2025. – Vol. 17, No. 1. – P. 35–45. DOI: 10.36236/1999-7590-2025-17-1-35-45. (in Russian).
8. Polilov A.N., Malakhov A.V., Tatus N.A., Shabalin V.V. Biomechanical principles for designing quasi-unidirectional composite structures and their fastening points // Bulletin of N.I. Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. – 2011. – No. 4, Pt. 5. – P. 2427–2430. (in Russian).
9. Polilov A.N., Tatus N.A., Plitov I.S. Assessment of the influence of fiber misalignment on stiffness and strength of profiled composite elements // Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines. – 2013. – No. 5. – P. 58–67. (in Russian).
10. Polilov A.N., Plitov I.S., Tatus N.A. Computer modeling of optimal curvilinear reinforcement structure in profiled composite elements // Problems of Mechanical Engineering and Automation. – 2013. – No. 4. – P. 73–79. (in Russian).

11. Eloy C. Leonardo's rule, self-similarity and wind-induced stresses in trees // arXiv preprint. – 2011. – arXiv:1105.2591v2 [physics.bio-ph]. – 15 Nov.
12. Inoue A., Kuraoka K., Kitahara F. Mathematical expression for the relationship between internode number and internode length for bamboo, Phyllostachys pubescens // Journal of Forestry Research. – 2012.–Vol. 23, No. 3.– P. 435–439. DOI: 10.1007/s11676-012-0281-1.
13. Minamino R., Tateno M. Tree branching: Leonardo da Vinci's rule versus biomechanical models // PLOS ONE. – 2014. – Vol. 9, Issue 4. – e9535. – Available at: www.plosone.org (http://www.plosone.org/).
14. Polilov A.N., Tatus N.A. Designing branched or profiled composite elements based on tree crown structure analogy // Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines. – 2017. – No. 4. – P. 76–84. (in Russian).
15. Polilov A.N., Tatus N.A., Tian Sh., Arutyunova A.S. Equal-strength branching composite beams with constant total cross-sectional area of variable elliptical sections // Mechanics of Composite Materials. – 2019. – Vol. 55, No. 3. – P. 465–482. (in Russian).
16. Rabotnov Yu.N., Polilov A.N. On failure of composite tubes in the shape of a Chinese lantern // Mechanics of Composite Materials. – 1983. – No. 3. – P. 548–550. (in Russian).
17. Plitov I.S., Polilov A.N. Optimal sizes of bamboo segments and composite tubes under compression, bending and torsion // Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines. – 2015. – No. 3. – P. 58–69. (in Russian).
18. Schulgasser K., Witztum A. On the strength of herbaceous vascular plant stems // Annals of Botany. – 1997. – Vol. 80. – P. 35–44. DOI:10.1006/ANBO.1997.0404.
19. Wegst U.G.K., Ashby M.F. The structural efficiency of orthotropic stalks, stems and tubes // Journal of Materials Science. – 2007. – Vol. 42. – P. 9005–9014. DOI: 10.1007/s10853-007-1936-8.
20. Niklas K., Spatz H.-C. Methods for calculating factors of safety for plant stems // The Journal of Experimental Biology. – 1999. – Vol. 202. – P. 3273–3280. DOI: 10.1242/jeb.202.23.3273.
21. Cho H.R., Rowlands R.E. Optimizing fiber direction in perforated orthotropic media to reduce stress concentration // Journal of Composite Materials. – 2009. – Vol. 43, No. 10. – P. 1177–1198. DOI:10.1177/0021998308103608.
22. Huang J., Haftka R.T. Optimization of fiber orientation near a hole for increased load-carrying capacity of composite laminates // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2005. – Vol. 30. – P. 335–341. DOI: 10.1007/s00158-005-0519-z.
23. Spickenheuer A., Schulz M., Gliesche K., Heinrich G. Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures // Plastics, Rubber and Composites – Macromolecular Engineering. – 2008. – Vol. 37, No. 5. – P. 227–232. DOI: 10.1179/174328908X309448.
24. Tosh M.W., Kelly D.W. On the design, manufacture and testing of trajectorial fibre steering for carbon fibre composite laminates // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2000. – Vol. 31. – P. 1047–1060. DOI: 10.1016/S1359-835X(00)00063-4.
25. Malakhov A.V., Polilov A.N. Construction of fiber trajectories bypassing a hole and their comparison with the wood structure in a knot zone // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. – 2013. – No. 4. – P. 57–62. (in Russian).
26. Malakhov A.V., Polilov A.N. Design of composite structures reinforced curvilinear fibres // Composites: Part A. – 2016. – Vol. 87. – P. 23–28. DOI: 10.1016/j.compositesa. 2016.04.005.

27. Sugiyama K., Matsuzaki R., Malakhov A., Polilov A., Ueda M., Todoroki A., Hirano Y. 3D printing of optimized composites with variable fiber volume fraction and stiffness using continuous fiber // Composites Science and Technology. – 2020. – Vol. 186. – 107905. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107905.
28. Hou Z., Tian X., Zhang J., Zhe L., Zheng Z., Li D., Malakhov A.V., Polilov A.N. Design and 3D printing of continuous fiber reinforced heterogeneous composites // Composite Structures. – 2020. – Vol. 237. – 111945. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111945.
29. Malakhov A.V., Polilov A.N., Li D., Tian S. Increasing the load-bearing capacity of composite plates in the bolted joint zone through the use of curvilinear trajectories and variable fiber volume fraction // Mekhanika kompozitnykh materialov. – 2021. – Vol. 57, No. 3. – P. 411–428. (in Russian).
30. Polilov A.N., Tatus' N.A. Technological mechanics of composites based on the study of nature's experience in creating strong biological structural materials // Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii. – 2021. – No. 1. – P. 59–85. DOI: 10.52261/02346206_2021_1_59. (in Russian).
31. Hou Z., Tian X., Zhang J., Zheng Z., Zhe L., Li D., Malakhov A.V., Polilov A.N. Optimization design and 3D printing of curvilinear fiber reinforced variable stiffness composites // Composites Science and Technology. – 2021. – Vol. 201. – 108502. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108502.
32. Wegst U., Bai H., Saiz E. et al. Bioinspired structural materials // Nature Mater. – 2015. – Vol. 14. – P. 23–36. DOI: 10.1038/nmat4089.

Дата поступления: 12 мая 2025 г.

DOI: 10.18411/vntr2025-178-2

УДК. 3054

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАШИН, КАК БОЛЬШИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Леонид Борисович Матусов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
matusoff.l@yandex,ru

Аннотация. *Допустим, что имеется математическая модель проектируемой машины, например, система дифференциальных уравнений, причем время ее расчета при фиксированном наборе коэффициентов (параметров) не позволяет провести оптимизацию в достаточно полном объеме. Допустим, что исследуемая система может быть разделена на подсистемы. Однако такая декомпозиция далеко не всегда решает проблему проведения оптимизации параметров этих систем. В этой связи естественно возникает вопрос: нельзя ли оптимизировать всю исследуемую систему по многим критериям качества путем оптимизации ее подсистем, имеющих существенно меньшую размерность, т.е. нельзя ли, зная допустимое и паретовское множества для каждой подсистемы, построить соответствующие множества всей системы?*
Ключевые слова**:** *система, подсистема, допустимое множество, множество Парето, псевдодопустимое множество.*

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0016.

MULTICRITERIA DESIGN OF MACHINE PARAMETERS AS LARGE MECHANICAL SYSTEMS

L.B. Matusov
Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
matusoff.l@yandex,ru

Abstract. *Suppose there is a mechanical system. Suppose we have a mathematical model of the machine being designed, for example, a system of differential equations, and the computation time for a fixed set of coefficients (parameters) does not allow for a sufficiently comprehensive optimization. Let's assume that the system under study can be divided into subsystems. However, such decomposition does not always solve the problem of optimizing the parameters of these systems. This naturally raises the question: is it possible to optimize the entire system under study across multiple quality criteria by optimizing its subsystems with significantly lower dimensionality? i.e., given the feasible and Pareto sets for each subsystem, is it possible to construct the corresponding sets for the entire system?*
Keywords: *system, subsystem, feasible set, Pareto set, pseudo feasible set.*

Acknowledgements. *The work was carried out using funds from the State Assignment, scientific topic code assigned by the organization FFGU-2024-0016.*

1. **Введение.** Пусть имеется механическая система. Пусть теперь данная система декомпозируется на m подсистем [1], каждая из которых описывается системой уравнений существенно меньшего порядка. Покажем, как зная псевдодопустимое множество (см. ниже) каждой из подсистем, получить допустимое и паретовское множество всей систем. Предположим, как и в [2], что имеется математическая модель исследуемой системы, и модель эта зависит от n изменяемых параметров $\alpha_1,...,\alpha_n$.Пусть $\alpha=(\alpha_1,...,\alpha_n)$, $\Phi_\nu(\alpha)$ – критерии качества механической системы и D — множество точек α, которые удовлетворяют всем, обеспечивающим нормальное функционирование рассматриваемого объекта, ограничениям [2].

Определение 1. Точка $\alpha^0 \in D$, называется Парето оптимальной, если не существует точки $\alpha \in D$ такой, что $\Phi_\nu(\alpha) \le \Phi_\nu(\alpha^0)$ для всех $\nu=1,...,k$ и $\Phi_{\nu_0}(\alpha) < \Phi_{\nu_0}(\alpha^0)$ по крайней мере для одного $\nu_0 \in \{1,\ldots,k\}$. Множество $P \subset D$ называется Парето оптимальным, если оно состоит из Парето оптимальных точек.

Под аппроксимацией или построением допустимого множества с заданной точностью понимают выделение из D такого конечного подмножества точек D_ε, которые удовлетворяют всем требованиям, обеспечивающим нормальное функционирование объекта, и которое с заданной точностью приближало бы любое значение каждого критерия, вычисленное в произвольной точке из области D.

Пусть $\Phi(\alpha)$- набор всех критериев качества в точке α и пусть ε_ν есть допустимая погрешность (по мнению эксперта) по критерию Φ_ν. Обозначим через ε набор $\{\varepsilon_\nu\}$, $\nu = 1,...,k$. Будем говорить, что область $\Phi(D)$ аппроксимирована конечным множеством $\Phi(D_\varepsilon)$ с точностью до набора ε, если для любого вектора $\alpha \in D$, существует вектор $\beta \in D_\varepsilon$ такой, что $\left|\Phi_\nu(\alpha)-\Phi_\nu(\beta)\right| \le \varepsilon_\nu$, $\nu=1,...,k$.

Предположим, что критерии являются непрерывными функциями, удовлетворяющими условию Липшица, т.е. для всех векторов α и β из области определения критерия Φ_ν существует число L_ν такое, что

$$\left|\Phi_\nu(\alpha)-\Phi_\nu(\beta)\right| \le L_\nu \max_j \left|\alpha_j-\beta_j\right|.$$

Пусть константы Липшица L_ν $\nu=1,...,k$, определены , и пусть N_1 это подмножество точек допустимого множества D, которые являются либо Парето оптимальными, либо лежат в ε-окрестности некоторой Парето оптимальной точки по крайней по какому либо одному критерию. Иными словами, $\Phi_\nu(\alpha^0) \le \Phi_\nu(\alpha) \le \Phi_\nu(\alpha^0) + \varepsilon_\nu$, где $\alpha^0 \in P$, и P- это Парето оптимальное множество. Пусть также $N_2 = D \backslash N_1$ и $\bar{\varepsilon}_\nu > \varepsilon_\nu$, где $\overline{\varepsilon_\nu}$ - набор погрешностей, больших по сравнению с предыдущими.

Определение 2. Допустимое множество решений $\Phi(D)$ называется нормально аппроксимированным, если любая точка множества N_1 аппроксимирована с точностью до ε, и любая точка из множества N_2 аппроксимирована с точностью до $\bar{\varepsilon}$.

Теорема 1. Если критерии качества системы непрерывны и удовлетворяют условию Липшица (специальному условию Липшица), то имеется нормальная аппроксимация Ф(D_ε) допустимого множества Ф(D) [3,4],

Предложенный в теореме 1 способ аппроксимации допустимой в области Ф(D) с заданной точностью позволяет решать проблему аппроксимации множества Парето. Пусть P - множество Парето в пространстве параметров (P C D), Ф (P) - образ в пространстве критериев; $\{\varepsilon_\nu\}$ - набор допустимых погрешностей. Ставится задача: построить конечное паретовское множество, аппроксимирующее Ф(P) с точностью до $\{\varepsilon_\nu\}$, ν = l,...,k. Пусть Ф($D_{\{\varepsilon_\nu\}}$) – нормальная $\{\varepsilon_\nu\}$ аппроксимация Ф(D) и P_ε - Парето -оптимальное подмножество в D_ε. Известно, что аппроксимация Ф(D) множеством Ф($D_{\{\varepsilon_\nu\}}$) не обеспечивает аппроксимации Ф(P) множеством Ф(P_ε) с заданной точностью. Это означает, что задача построения множества Парето некорректна по А.Н. Тихонову. Решением такой задачи является, как известно, построение регуляризирующей последовательности Ф(P_ε) , аппроксимирующей Ф (P). В приводимой ниже теореме дается конструкция регуляризирующей последовательности Ф(P$_{\{\varepsilon_\nu\}}$)

Теорема 2. Если критерии непрерывны и удовлетворяют условию Липшица, то существует регуляризирующая последовательность Ф(P$_{\{\varepsilon_\nu\}}$) [5],

Таким образом, в результате получаем аппроксимацию множества Парето, обладающую следующим свойством: в $\{\varepsilon_\nu\}$-окрестности любой точки из Ф(P) найдется точка из Ф(P$_{\{\varepsilon_\nu\}}$) и наоборот. Так как в практических задачах оптимального проектирования количество точек, принадлежащих множеству Парето, как правило, весьма невелико, вследствие наличия жестких функциональных ограничений процедура построения конечной аппроксимации множества Парето конструктивна для этих задач в смысле реализуемости на ЭВМ. На основании приведенных выше результатов становиться возможным вычисление допустимого и паретовского множеств большой системы с помощью допустимых и паретовских множеств ее подсистем.

2. **Методы декомпозиции и агрегирования в задачах многокритериальной оптимизации параметров большой системы.** Иногда после применения методов декомпозиции большая система может быть оптимизирована. Однако для нелинейных систем не всегда имеются достаточно эффективные и точные методы. Существуют и другие ограничения на применение методов декомпозиции. В тех случаях, когда они могут быть применены, возможность оптимизации большой системы неочевидна.

К решению данной проблемы возможен иной подход. Он возникает при рассмотрении исследуемого объекта в виде иерархической структуры [5].

Рассмотрим три типичных варианта поиска иерархически согласованных решений в задачах проектирования машин. Первые два из них (I и II) предназначены для решения задач оптимизации в сравнительно простых случаях. Вариант III применим к более сложным системам. К этим трем вариантам условно можно отнести задачи проектирования различных видов станков, вибрационных технологических машин, машин для литья и т. п.

Выделим общие положения для рассматриваемых вариантов.

1. Полагаем, что для первых трех имеются математические модели исходных систем,

которые по вектору критериев Ф не представляется возможным оптимизировать, т. е. для того, чтобы поставить и решить задачу многокритериальной оптимизации, требуется очень много времени на ЭВМ. Однако выполнить небольшое количество расчетов значений критериев Ф при заданных векторах параметров можно.

2. Система состоит из подсистем. Связи, при помощи которых одна подсистема взаимодействует с другой, назовем внешними. По аналогии действие одной подсистемы на другую определим как внешнее. Чтобы выделить подсистему в виде автономной системы, нужно рассмотреть воздействие на нее всех остальных подсистем, а также внешних возмущений со стороны окружающей среды.

3. Предполагается, что подсистемы можно оптимизировать по заданному вектору критериев.

Идея оптимизации системы в целом состоит в том, что, оптимизируя каждую из подсистем, получаем для нее допустимое или несколько большее (псевдодопустимое) множество. После этого «стыкуем» некоторым образом векторы из этих множеств в соответствующие векторы всей системы. На образованном множестве определяем, удовлетворяются ли критериальные и функциональные ограничения системы, и в итоге получаем допустимое множество D для всей системы.

Оптимальное решение ищется на множестве D. Оно является иерархически согласованным.

Вариант I. Необходимо оптимизировать исходную систему по вектору критериев Φ_1, ..., Φ_n, Φ_{n+1}, ..., Φ_{n+k}, о которой известно, что критерии Φ_1, ..., Φ_n описывают динамику машины — усилия, амплитуды перемещений, скоростей, ускорений, частоты, массы и т. п., а критерии Φ_{n+1}, ..., Φ_{n+k} — прочность, надежность, долговечность. Здесь могут быть рассмотрены и другие критерии. Предполагается, что исходную систему можно оптимизировать по критериям Φ_1, ..., Φ_n. Напрашивается идея «разбиения» критериев на две части и проведения по ним последовательной оптимизации. Важным соображением в пользу этого подхода является то, что для расчета напряженно-деформированного состояния достаточно знать динамические нагрузки на подсистемы.

Уровень 1. Решается задача оптимального проектирования системы по динамическим критериям. Итогом решения является нахождение функциональных и критериальных ограничений и допустимого множества $\bar{D}$, в том числе и допустимого множества внешних воздействий на каждую подсистему. (Ясно, что $\bar{D}$ больше истинного допустимого множества D, так как пока не рассмотрены другие ограничения, в том числе на прочностные показатели.)

Уровень 2. Определив на предыдущем уровне с помощью вектора внешних воздействий граничные условия для каждой из подсистем, рассматриваем последние, как самостоятельные системы, и решаем задачу по критериям
Φ^g_{n+1}..., Φ^g_{n+k}, g=1,2,…,p, где p — количество подсистем. Для каждой из них строим свое множество решений $\overline{D_g}$, по функциональным и критериальным ограничениям, часть из которых учитывает влияние остальных подсистем на исследуемую. Критерии g-й подсистемы рассчитываются при значениях параметров внешних связей, соответствующих векторам из $\overline{D}$.

Уровень 3. Теперь нужно «стыковать» векторы параметров из множеств $\overline{D_g}$. Возьмем два из них, $\overline{D_1}$ и $\overline{D_2}$. Рассмотрим некоторый вектор β из допустимого множества внешних связей

первой подсистемы со второй $\overline{D_{12}}$, а также множество M_1 - векторов из $\overline{D_1}$ и M_2 из $\overline{D_2}$, полученных при β. Пусть вектор $\alpha \in M_1$ Присоединим к нему β, т. е. к параметрам α в качестве новых компонентов приписываем параметры β. Добавим к полученному вектору некоторый вектор $\gamma \in M_2$. Повторим это и с другими векторами из M_2. Проделаем данную операцию при всех векторах из M_1. Далее рассматриваем все остальные векторы из $\overline{D_{12}}$ и для них выполняем все предыдущие операции. Аналогично происходит стыковка и с другими подсистемами. В результате получим подмножество векторов всей системы $\overline{D}$ которое возможно больше допустимого D, так как некоторые векторы из $\overline{D}$ могут не удовлетворять критериальным или функциональным ограничениям на систему в целом. С другой стороны, параметры, не удовлетворяющие ограничениям по напряженно-деформированному состоянию для подсистем, не могут, как известно, удовлетворять этим требованиям для всей системы.

Поэтому после получения векторов параметров $\overline{D}$ рассчитываются критерии качества всей системы и проверяется выполнение функциональных и критериальных ограничений. Таким образом, получаем допустимое множество решений D. Если же необходимо рассмотреть некоторые, ранее неучтенные критерии для всей системы (например, себестоимость), то их значения определяются на D и после введения соответствующих ограничений строится новое допустимое множество.

Вариант II. Имеется исходная математическая модель. Строится упрощенная модель. Упрощение достигается за счет сокращения числа степеней свободы подсистем исходной модели при сохранении внешних связей. Предполагается, что на уровне 1 при данных упрощениях систему можно оптимизировать по вектору критериев Ф. Здесь, так же как и в варианте I, необходимо получить допустимые векторы для определения внешних связей подсистем. На уровне 2 оптимизируется каждая подсистема с учетом тех критериев, которые не могли быть определены из упрощенной модели. При этом граничные условия на подсистемы рассчитываются по допустимым векторам упрощенной системы. Как и ранее, для подсистем находим множества $\overline{D_g}$. Их стыковка на уровне 3 осуществляется аналогично тому, как это имеет место для варианта I. Для состыкованных векторов параметров рассчитываются значения критериев качества исходной математической модели. С учетом всех ограничений получаем множество D. Очевидно, что если после определения D нет иных критериев и ограничений на систему, то D — допустимое множество решений.

Вариант III. Имеется исходная математическая модель системы и вектор критериев $Ф_1$, ..., $Ф_n$. Упрощение модели достигается главным образом за счет разумного сокращения количества внешних связей. В упрощенной модели по сравнению с исходной может оказаться меньше критериев: исключаются те, которые зависят от параметров отброшенных связей. Нужно стремиться к тому, чтобы в упрощенной модели сохранилась большая часть основных критериев. (Отброшенные критерии будут учтены в дальнейшем.) Саму упрощенную систему не предполагается оптимизировать. Если же это возможно, то построение множества D в основном аналогично варианту I.

Уровень I. Оптимизация подсистем отличается от предыдущих схем. Здесь вектор параметров внешних связей не фиксирован, а варьируется одновременно с параметрами подсистем. Граничные условия для подсистемы определяются каждый раз по заданному вектору внешних связей с помощью расчета упрощенной модели. Предполагается, что при

оптимизации можно варьировать только частью параметров системы. Для этого необходимо выполнение условия: в системе должно существовать достаточное число параметров, влияющих на критерии подсистемы, в которую они входят, и не влияющих на критерии других подсистем.

Достаточность понимается в том смысле, что каждая из подсистем может быть оптимизирована. Это условие является необходимым, так как если окажется, что критерии какой-либо из подсистем зависят от всех или почти всех параметров системы, то оптимизировать ее будет так же трудно, как и всю систему.

Решением задачи оптимизации для g-й подсистемы должно быть получение множества $\overline{D_g}$, содержащего допустимое множество D_g. Множество $\overline{D_g}$ определяется по функциональным и критериальным ограничениям. Это означает существование таких ограничений на показатели подсистем, нарушение хотя бы одного из которых влечет неудовлетворительное функционирования всей системы.

Удовлетворение этим ограничениям еще не гарантирует допустимость соответствующих параметров системы. Данное условие можно ослабить, если допустить, что оно выполняется не для всех $\Phi_v(\alpha)$, а только для некоторых. Смысл введения этих ограничений заключается в том, что при оптимизации мы удаляем множество векторов системы, которые указанным ограничениям не удовлетворяют. Рассчитывать значения критериев системы для таких векторов уже не надо. Этим также сокращается время, необходимое для оптимизации системы.

Уровень II. Операция стыковки векторов. Так как варьируются параметры связей между подсистемами, стыковка векторов из множеств $\overline{D_i}'$ и $\overline{D_j}'$ производится по равным значениям общих для этих подсистем параметров, которые одновременно влияют на критерии рассматриваемых подсистем. Стыковка выполняется аналогично соответствующей операции из варианта I.

Дальнейшее определение D на множестве $\overline{D}$ векторов, полученных в результате стыковки, происходит подобно тому, как это описано для вариантов I и II. Поскольку ранее были отброшены некоторые связи системы, то на $\overline{D}$ необходимо учесть значения всех критериев исходной математической модели. Таким образом, исходная модель рассчитывается неоднократно. Однако это делается только в точках множества $\overline{D}$, что может оказаться достаточным для оптимизации всей системы. После введения критериальных ограничений получаем допустимое множество D.

После построения аппроксимации допустимого множества аппроксимация множества Парето всей системы строится согласно алгоритмам, содержащимся в доказательствах теорем 1 и 2.

Выводы. Возможность оптимизировать всю систему путем оптимизации ее декомпозированных подсистем возникает вследствие таких факторов.

1) Расчет подсистемы производится либо из экспериментальных данных о реакциях подсистем, либо, пользуясь спецификой конкретного объекта, путем расчета некоторой части всей системы, содержащей данную подсистему. Тем самым рассчитывается каждая подсистема существенно меньшего порядка, чем вся система, т.е. время для расчета одного варианта для подсистемы намного меньше, чем если бы мы рассчитывали один вариант всей системы.

2) Введением критериальных ограничений мы удаляем из дальнейшего рассмотрения достаточно большое множество векторов параметров.
3) Результаты оптимизации каждой из подсистем учитываются при проведении оптимизации других подсистем.
4) Вследствие применения операции надстройки над множествами $\overline{D_i}$ (ввиду наличия достаточно жестких ограничений) получается множество, содержащее, как правило, небольшое количество точек. Система в целом рассчитывается только в этих точках.
5) Для оптимизации подсистем, также как и для оптимизации всей системы используются алгоритмы, содержащиеся в доказательствах приведенных выше теорем. Таким образом, применение данного метода позволяет оптимизировать большую, а также сформулировать технические условия и технические задания и к ее подсистемам, иными словами, получать иерархически согласованные решения.

Список литературы

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям. - М.: Наука, 1972. - 242 с.
2. Соболь И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. 2-е издание - М.: Дрофа, 2006. - 176 с.
3. Statnikov R.B. and Matusov L.B. Multicriteria Optimization and Engineering // New York: Chapman & Hall. 1995. 236 p.
4. Statnikov R.B. and Matusov L. Use of P_τ Nets for the Approximation of the Edgeworth-Pareto Set in Multicriteria Optimization // Journal of Optimization Theory and Applications. 1996. Vol. 91. # 3, P. 543-560.
5. Statnikov R.B. and Matusov J.B. Multicriteria Analysis in Engineering. Dordrecht/ Boston/London// 2002.Kluwer Academic Publishers. 140 p.

Дата поступления: 23 сентября 2025 г.

DOI: 10.18411/vntr2025-178-3

УДК 621.793

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК УГЛЕРОДА НА ПЛАСТИНАХ ИЗ КРЕМНИЯ

© Виктор Игоревич Черкунов[1], Людмила Алексеевна Кузьмина[2], Анатолий Васильевич Щагин [3], Владислав Витальевич Дадонов[4]
[1]АО «НПП «ЭСТО», г. Москва, г. Зеленоград, Россия
chvi.esto@ya.ru
[2]АО «НПП «ЭСТО», г. Москва, г. Зеленоград, Россия
kuzmina@nppesto.ru
[3]НИУ «МИЭТ», г. Москва, г. Зеленоград, Россия
schagin4@rambler.ru
[4]ООО «Эстика», г. Москва, г. Зеленоград, Россия
vdadonov@estika.ru

Аннотация. *Получение жестких масок из углерода является актуальной задачей в производстве МЭМС или фотонных устройств. Существует несколько технологий получения тонких пленок. В данной работе авторами изучается возможность получения тонкой пленки углерода с применением магнетронного распылительного устройства со сканированием. По результатам работы авторами отмечено, что применение нагрева необходимо для получения хорошей адгезии пленки углерода к кремнию. Так же отмечены низкие скорости роста пленок.*
Ключевые слова: *тонкие пленки углерода, магнетронное распыление, жесткие маски, кремниевые пластины, аморфный углерод, МЭМС, углеродные пленки, травление кремния.*

PRODUCTION OF THIN CARBON FILMS ON SILICON WAFERS

© Viktor Igorevich Cherkunov[1], Lyudmila Alekseevna Kuzmina[2], Anatoly Vasilyevich Shchagin[3], Vladislav Vitalievich Dadonov[4]
[1]AO «NPP «ESTO», Moscow, Zelenograd, Russia
chvi.esto@ya.ru
[2] AO «NPP «ESTO», Moscow, Zelenograd, Russia
kuzmina@nppesto.ru
[3]NIU «MIET», Moscow, Zelenograd, Russia
schagin4@rambler.ru
[4]LLC «Estika», Moscow, Zelenograd, Russia
vdadonov@estika.ru

Abstract. *Obtaining rigid masks from carbon is an urgent task in the production of MEMS or photonic devices. There are several technologies for producing thin films. In this paper, the authors study the possibility of obtaining a thin carbon film using a magnetron sputtering device with scanning. Based on the results of the work, the authors noted that the use of heating is necessary to obtain good adhesion of the carbon film to silicon. Low film growth rates are also noted.*
Keywords: *thin carbon films, magnetron sputtering, rigid masks, silicon wafers, amorphous carbon, MEMS, carbon films, silicon etching.*

Введение. В технологических маршрутах изготовления микроэлектромеханических или фотонных устройств присутствуют операции травления кремния и его оксида на относительно большую глубину. Для выполнения этой операции требуется высокое отношение скоростей травления двух различных материалов маски и кремния или оксида кремния, то есть требуется высокая селективность [1]. Пленки из аморфного углерода являются многообещающими кандидатами на роль материалов для жёстких масок нового поколения [2].

Существует проверенная технология получения углеродных жестких масок методом плазмостимулированного химического осаждения (PECVD) [3]. Данная технология CVD с использованием плазмы для осаждения аморфного углерода на кремниевые пластины, поскольку углерод сочетает в себе преимущества высокой селективности травления по отношению к кремниевым соединениям с лёгкостью удаления.

Так же существует множество технологий получения углеродных пленок магнетронным распылением. Например, Юрков А. Н., Мельник Н. Н., Сычев В. В и др. использовали в качестве плазмообразующего газ водород [4]. Авторы другой работы для нанесения углеродных покрытий используют биполярный комбинированный режим магнетронного и дугового распыления [5]. В целом технология магнетронного распыления графита для получения пленок углерода известна. Таким образом перед авторами данной статьи была поставлена задача получения тонкой пленки углерода на пластинах из кремния.

Описание эксперимента. В решаемой авторами задачи необходимо было получить пленки аморфного углерода на тонких пластинах из монокристаллического кремния. Толщина пленки должна достигать 500нм в соответствии с требованиями к глубине травления с учетом теоретической селективности травления кремния по отношению к аморфному углероду.

В качестве метода для получения углеродной пленки был выбран метод магнетронного распыления в аргоне на постоянном токе. Для распыления было применено магнетронное распылительное устройство со сканированием с диаметром мишени 100мм. Такое устройство позволяет осаждать тонкие пленки на подложки диаметром до 300 мм с равномерностью до 3% [6]. Магнетронное распылительное устройство, применяемое в данной работе изображено на рисунке 1. В качестве мишени использовалась мишень из углерода, изготовленная методом горячего прессования. Охлаждение мишени косвенное, через медный мишенедержатель.

Эксперименты проводились на модернизированной АО «НПП «ЭСТО»» установке УВН-71. Модернизация заключалась в полной автоматизации установки, замене технологических устройств на магнетроны, нагревателя на прямонакальный, а также замене всех средств откачки на безмасляные с криогенным высоковакуумным насосом.

Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе производилось напыление без предварительного нагрева, на комнатной температуре. На втором этапе выполнялся предварительный нагрев пластины до температуры около 250°С. Нагрев производился прямонакальным нагревателем, в котором в качестве нагревательного элемента используется тантал. Нагрев подложки способствует улучшению адгезии за счёт снижения внутренних напряжений в пленке и увеличения подвижности атомов на поверхности кремния.

Процесс нанесения покрытия осуществлялся в следующей последовательности: сначала была вакуумирована камера до давления $2x10^{-3}$ Па, далее на первом этапе в нее подавался аргон до давления $2,2x10^{-1}$ Па, включался магнетрон на мощности 300 Вт и производилось напыление в течение определенного времени. На втором этапе после откачки камеры

выполнен дополнительно нагрев. Фотография процесса напыления приведена на рисунке 2. При напылении из углеродной мишени для получения мощности 300 Вт на мишень подавалось напряжение 1000В. При этом было отмечено, что в процессе напыления для поддержания мощности 300Вт напряжение увеличивалось с 955 до 1000В, на что по мнению авторов работы влияет нагрев мишени.



Рис. 1. Фотография магнетронного распылительного устройства со сканированием.



Рис. 2. Фотография процесса напыления.

Для определения толщины нанесённой на пластину пленки углерода использовался профилометр Dektak 3030, изображен на рисунке 3. Он позволяет точно определить толщину и размеры нанесённого материала на поверхности образцов, используя измерение различия высот между двумя участками поверхности — например, между участком без пленки и участком с пленкой. Этот метод обеспечивает высокое разрешение и надёжность полученных данных, что важно для оценки качества и однородности углеродных пленок.



Рис. 3. Фотография профилометра Dektak 3030.

Обсуждение результатов. По результатам первого этапа напыления углеродных пленок, удалось получить пленки толщиной до 300нм. Пленки большей толщины имели низкую адгезию и осыпались с подложек. По результатам анализа пленки состояли на 96% из углерода и имели примеси в виде кислорода, железа и кремния. Изображения диаграммы спектров приведено на рисунке 4. Наличие железа и кремния в пленках авторы связывают с применяемой оснасткой из нержавеющей стали и пластинами из кремния.
По результатам второго этапа напыления с нагревом удалось получить пленки толщиной до 800нм. Фотографии образца и измерений приведены на рисунке 5 и 6. При этом пленки удерживались на кремнии и имели хорошую адгезию. Но стоит отметить, что скорости напыления углерода низкие и составили около 6 нм/мин.

Заключение. Получение пленок углерода в качестве жестких масок возможно с применением методов магнетронного распыления углерода на постоянном токе. Однако данный метод имеет низкие скорости роста пленок.
Эксперименты доказали необходимость предварительного нагрева подложки для обеспечения адгезии и стабильности пленки.
В будущих работах авторы планируют проведение экспериментов с применением мишеней из пиролитического графита, который в теории имеет большие скорости распыления.

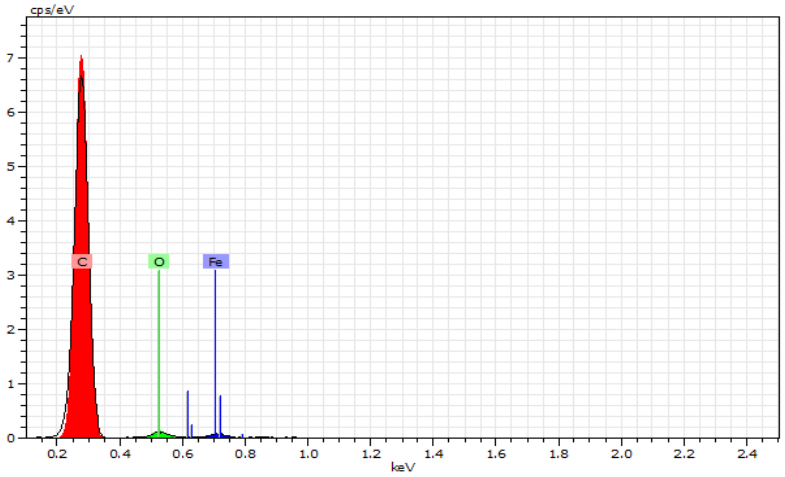


Рис. 4. Состав пленки углерода.



Рис. 5. Фотография образца с напыленной пленкой углерода.



Рис. 6. Фотография измерения образца второго этапа на профилометре Dektak 3030.

Список литературы

1. Галперин В. А., Данилкин Е. В., Мочалов А. И. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях: учебное пособие / под ред. С. П. Тимошенкова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 283 с.: ил. – (Нанотехнологии). – ISBN 978-5-9963-0032-7.
2. Kim S., Jeong M.-W., Kim K., Kim U., Kima M., Joo S.-Y., Joo Y.-C. Effect of N doping on the microstructure and dry etch properties of amorphous carbon deposited with a DC sputtering system // The Royal Society of Chemistry. – 2023. – № 13. – С. 2131-2139.
3. Vogt M., Buerger M., Seamons M., et al. Introduction of PECVD carbon hardmasks (APF™) for Sub-90nm dram technology – 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/289666746_Introduction_of_PECVD_carbon_hardmasks_APF_for_Sub-90nm_dram_technology
4. Юрков А. Н., Мельник Н. Н., Сычев В. В., и др. Синтез углеродных пленок магнетронным распылением графитовой мишени с использованием водорода в качестве плазмообразующего газа // Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук: журнал. – 2011. – № 9. – С. 28-33.
5. Оскирко В. О., Захаров А. Н., Гренадеров А. С., и др. Нанесение углеродных покрытий в биполярном комбинированном режиме магнетронного и дугового распыления // Вестник Башкирского университета. – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 270-277. – DOI 10.33184/bulletinbsu2023.3.9
6. Черкунов В. И. Оптимизация неравномерности магнетронного напыления пленок алюминия и оксида алюминия при взаимном перемещении подложки и магнетрона // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2025. – Т. 18, № 1. – С. 14-21. – DOI 10.32603/2071-8985-2025-18-1-14-21. – EDN ATGFRG.

References

1. Galperin V. A., Danilkin E. V., Mochalov A. I. Plasma etching processes in micro- and nanotechnology: textbook / edited by S. P. Timoshenkov. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2010. – 283 p.: ill. – (Nanotechnology). – ISBN 978-5-9963-0032-7. (in Russian).
2. Kim S., Jeong M.-W., Kim K., Kim U., Kima M., Joo S.-Y., Joo Y.-C. Effect of N doping on the microstructure and dry etch properties of amorphous carbon deposited with a DC sputtering system // The Royal Society of Chemistry. – 2023. – № 13. – С. 2131-2139.
3. Vogt M., Buerger M., Seamons M., et al. Introduction of PECVD carbon hardmasks (APF™) for Sub-90nm dram technology – 2004. URL:https://www.researchgate.net/publication/289666746_Introduction_of_PECVD_carbon_hardmasks_APF_for_Sub-90nm_dram_technology.
4. Yurkov A. N., Melnik N. N., Sychev V. V., and others. Synthesis of carbon films by magnetron sputtering of a graphite target using hydrogen as a plasma–forming gas // Brief Reports on Physics at the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences: journal, 2011, No. 9, pp. 28-33. (in Russian).
5. Oskirko V. O., Zakharov A. N., Grenaderov A. S., and others. Application of carbon coatings in a bipolar combined mode of magnetron and arc sputtering // Bulletin of the Bashkir University. – 2023. – Vol. 28. – No. 3. – pp. 270-277. – DOI 10.33184/bulletinbsu2023.3.9 (in Russian).

6. Cherkunov V. I. Optimization of the irregularity of magnetron sputtering of aluminum and aluminum oxide films during mutual displacement of the substrate and magnetron. // Izvestiya SPbSETU LETI. – 2025. – Vol. 18, No. 1. – pp. 14-21. – DOI 10.32603/2071-8985-2025-18-1-14-21. (in Russian).

Дата поступления: 17 июля 2025 г.