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.

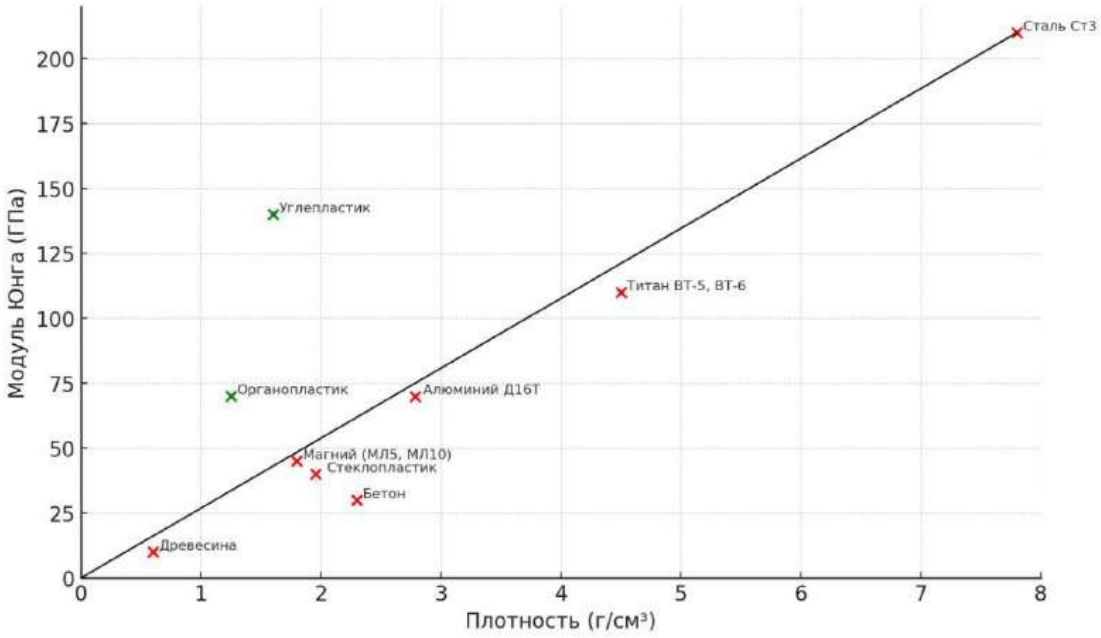


Рис. 1. Удельный модуль упругости (модуль Юнга, отнесенный к удельному весу) разных классов материалов.

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.

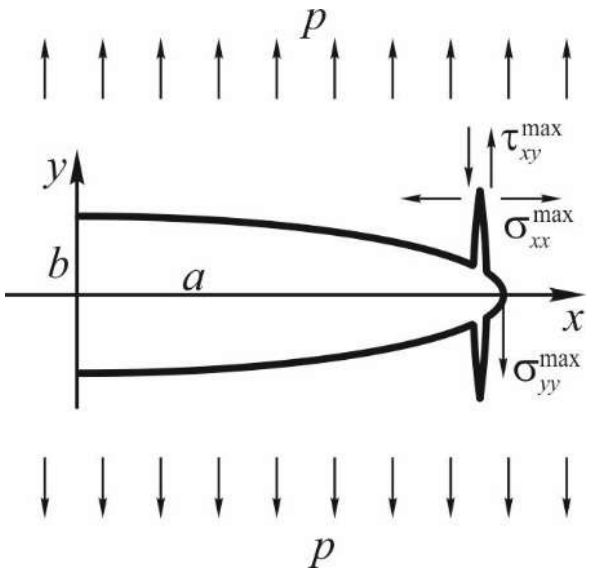


Рис. 2. Механизм торможения трещины за счет расщепления слабой границы раздела «волокно-матрица».

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].

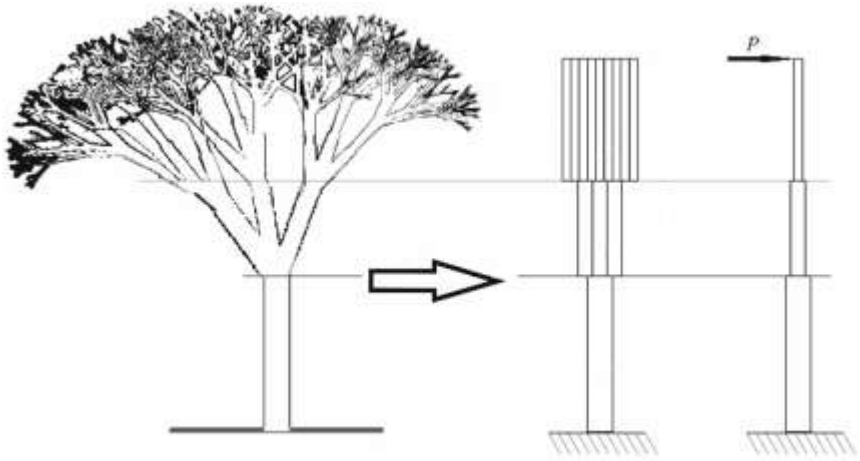


Рис. 3. Модель последовательного ветвления кроны на 3 ветви для максимального роста изгибной податливости с сохранением прочности и суммарной площади сечений ветвей.

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.

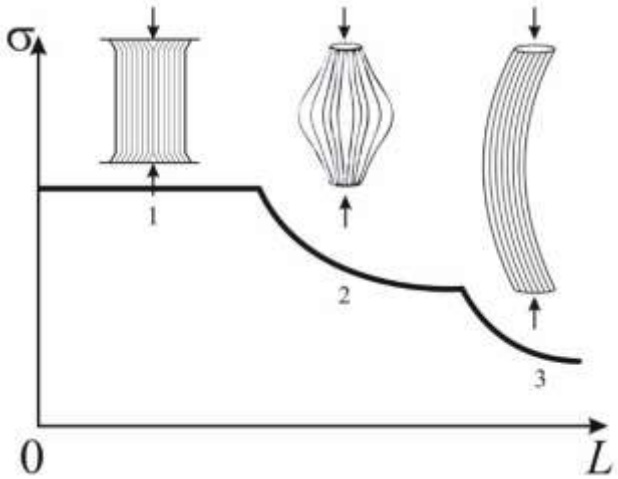


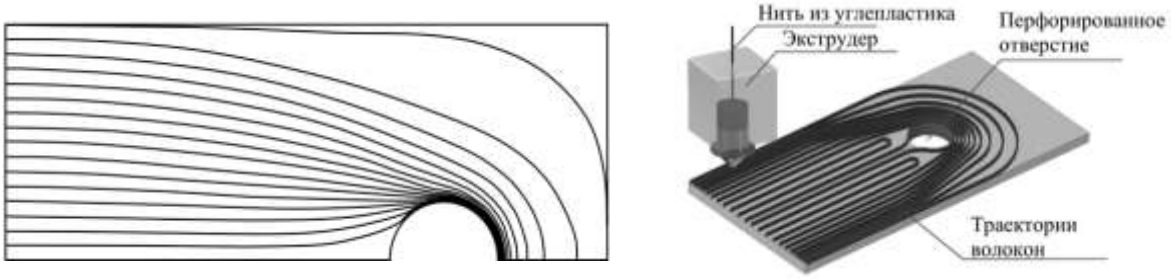
Рис. 4. Различные виды разрушения при сжатии звена бамбука или композитной трубы. 1 – локальное смятие («микроволновое гофрирование»); 2 – «китайский фонарик» (множественное расщепление с выпучиванием образовавшихся полосок); 3 – макропотеря устойчивости (по Эйлеру).

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.