

БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ*

А.Н. Полилов, Н.А. Татусь

В статье проанализированы основные, нетрадиционные эффекты применения полимерных волокнистых композитов, связанные не только с их механическими и физическими свойствами, но и с особенностями технологии изготовления композитных изделий, и с возможностью использовать принципы оптимального проектирования, наблюдаемые в живой природе. Проведен анализ эффективности композитных, ветвящихся, биоподобных элементов конструкций, которые можно использовать в качестве пружин – накопителей упругой энергии.

Ключевые слова: композитный материал, эффекты применения композитов, ветвящаяся и профилированная структура, правило Леонардо.

BIOMECHANICAL PRINCIPLES FOR OPTIMUM DESIGN OF COMPOSITE STRUCTURES

A.N. Polilov, N.A. Tatus

The main non-traditional effects of polymeric composites application are discussed, and these effects are connected not only with mechanical & physical properties, but also with technological feature and with possibility of using of animate Nature optimum design principles. The analysis of effectiveness of composite branched, bio-inspired structure members are presented, and these members may be used as springs which can store elastic energy.

Keywords: composite material, effects of composite application, branched and shaped equistrong structure, Leonardo's rule.

Введение

В последние десятилетия заметно возрос интерес к секретам строения и функционирования живых систем, и это относится не только к робототехнике, биоинформатике, бионике, но и к изучению структуры прочных биологических материалов типа древесины, костной ткани, дентина зуба. Этот интерес во многом связан с появлением композитов – искусственно созданных материалов с управляемыми структурой и свойствами. С помощью укладки волокон по рациональным траекториям можно, как и в живой природе, создавать материалы, направленные свойства которых согласуются с внешними полями нагрузок [1–7]. Например, при отсутствии ветровых нагрузок ствол дерева по мере роста остается гладким (мачто-

вые сосны), а при воздействии ветра, способного привести к скручиванию и расщеплению, на стволе сохраняется система сучков, создающая свилеватую структуру, отлично сопротивляющуюся расщеплению. Да и сами древесные волокна располагаются не строго параллельно стволу, а по незаметной спирали, совершая полный оборот вокруг ствола с охватом 6–10 м по высоте, что соответствует оптимальной малой разориентации в 3–5° [8, 9], практически не снижающей продольную прочность, но резко увеличивающей сопротивление расщеплению.

С этих позиций вызывает интерес структура сучка [1, 10] – самого прочного места крепления в биокомпозитной конструкции: соединение оказывается прочнее, чем соединяемые

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы.

элементы. Такой показатель – недостижимая мечта создателей композитных конструкций, в которых коэффициент реализации прочности, например заклепочных соединений, редко превышает 0,3–0,4. Однако компьютерным моделированием можно построить равнопрочные криволинейные траектории волокон [11–13], «обтекающих» отверстие (*fibers flow around the hole*), заклепку или другой узел крепления. Прочность равнонапряженных волокон при подобной структуре армирования значительно возрастает.

Очень интересна для изучения макро-структура бамбука [5]. Что заставляет природу создавать упрочняющие диафрагмы на определенных расстояниях вдоль стебля? Необходимость предотвратить расщепление при сжатии по форме «китайского фонарика» [8, 14] и при кручении. В последнем случае диафрагмы стесняют деформацию сечения [11, 15] и переводят касательные напряжения в менее опасные продольные, существенно повышая сопротивление крутящему моменту от ветровой нагрузки.

Подобным приемам повышения прочности и надежности материалов-конструкций нужно учиться у природы [16–18], учитывая, что разрабатываемые композитные технологии, в принципе, позволяют при низких энергозатратах создавать изделия с любыми требуемыми формой и структурой. Относительно новый международный термин *bio-inspired method* означает «метод, подсказанный природой». По мнению авторов, развитие технологической механики волокнистых композитов связано с созданием био-подобных структур на основе природных принципов оптимизации «материалов-конструкций». Основную роль в этом призваны сыграть аддитивные технологии [19, 20], трехмерная печать, плетение композитных изделий сложной формы. Необходимость одновременного создания материала и конструкции обуславливает роль механики, методов проектного расчета и оптимизации в попытках использовать методы природы в борьбе за живучесть конструкции, в том числе ветвление – для повышения изгибной податливости кроны дерева с целью снижения опасной ветровой нагрузки.

Цель работы – анализ возможности применения биомеханических принципов (ветвления) для проектирования композитных накопителей упругой энергии, иллюстрация

эффектов от применения волокнистых композитов на примере упругого элемента.

Основные объекты и эффекты применения композитов

Традиционно в учебных курсах для будущих инженеров в качестве главного преимущества композитов с полимерной матрицей (стекло-, угле-, органопластиков) называют высокие удельные (отнесенные к удельному весу) упруго-прочностные свойства. Действительно, для аэрокосмических конструкций или военной авиации эти свойства являются определяющими: «снижение веса покупается любой ценой». Применительно к наземному транспорту, объектам гражданского машиностроения, морским судам и конструкциям критерии эффективности оказываются совершенно другими: простого снижения массы недостаточно, и экономическая эффективность может быть достигнута, только если замена металлов на композиты позволяет решить некоторую принципиальную техническую задачу, недостижимую в металлическом исполнении.

Эффекты от применения композитов с полимерной матрицей (ПКМ) следует подразделять на:

- прямые, связанные с физико-механическими свойствами материалов (низкий удельный вес, высокая прочность, химическая стойкость, немагнитность и др.);
- технологические (безотходность и низкая энергоемкость производства, отсутствие необходимости в механической обработке и отделке, простота создания изделий сложной формы);
- конструкционные, связанные с возможностью оптимального проектирования не только на уровне размеров и формы детали, но и на уровне структуры армирования материала (оптимизация схемы армирования, снижение числа деталей, рост критических частот колебаний и вращения, повышение точности движения за счет малых инерционных сил).

Прямые эффекты. Снижение массы, например в автомобилестроении, эффективно в тех случаях, когда вес оказывается основным лимитирующим фактором, все более важным с ростом скорости автомобилей. Трехслойные панели с сотовым наполнителем стали оптимальным материалом для грузовых контейнеров, и из-за огромного объема производства и большого числа транспортно-погрузочных операций снижение массы контейнера в 2 раза

оказывается экономически выгодно даже при заметном росте его стоимости. Эффективно прямое снижение массы стеклопластикового кузова военных грузовиков, для которых в боевых условиях жизненно важна возможность быстрого набора скорости для выхода из зоны обстрела после разгрузки.

Коррозионная стойкость стеклопластиков делает их применение эффективным для деталей, контактирующих с влагой (панели кузова) или с горюче-смазочными материалами (ГСМ): бензобак, топливные и тормозные магистрали.

Стойкость к морской воде – основное свойство, благодаря которому 99 % малых судов в США и многих других развитых странах изготовлены из стеклопластиков.

Для техники, работающей в условиях Сибири и Крайнего Севера, решающую роль играет нехрупкость, практически нечувствительность ПКМ к низким температурам, даже при наличии конструкционных (отверстия, канавки) или эксплуатационных (трещины) концентраторов напряжений. Нехрупкость при криогенных температурах обеспечивает возможность использования стеклопластиков в среде жидкого гелия: 4 К, когда реализуется явление сверхпроводимости (в том числе так называемой высокотемпературной, пока лишь при температуре жидкого азота: 77 К = –196 °С).

К другим важнейшим физическим свойствам относится немагнитность стеклопластиков, делающая их незаменимыми для минных тральщиков. Радиопрозрачность позволяет изготавливать из стеклопластика несущую часть оболочки ракеты, где расположены радиолокационные приборы. Технология создания малозаметных летательных аппаратов также опирается на свойство радиопрозрачности органических полимеров.

Можно приводить множество таких примеров, но важно отметить, что композиты – не просто замена металла, а материалы, способные принципиально улучшить служебные характеристики новой техники и машин будущего.

Технологические эффекты. Композитные технологии позволяют существенно уменьшить число деталей, например, в элементах интерьера легковых автомобилей, переднего интегрального оперения грузовиков. Низкая энергоемкость производства и ремонта (не нужны высокие температуры и большие усилия для формования) позволяет производить конструкции, на-

пример в космосе или в труднодоступных областях при отсутствии тяжелого оборудования и стационарных источников энергии.

Следует отметить принципиальное отличие всей технологической цепочки производства композитных изделий от традиционных «металлических» технологий, которые включают в себя энергоемкие и вредные в экологическом отношении процессы: «добыча руды и кокса – выплавка чугуна и стали – отливка – прокатка – изготовление заготовок – механическая обработка – сборка – отделка – покраска». Наибольший эффект может быть достигнут, когда удастся реализовать «композитную» малоэнергоемкую (невысокие температуры полимеризации, небольшие усилия формования), безотходную технологическую цепочку: «производство компонентов (волокна, матрицы) – создание полуфабрикатов (ткани, ленты, ровинги, препреги) – формование готовых изделий (без механической обработки и сборки, с окраской связующего в массу)».

Конструкционные эффекты. Преимущества ПКМ особенно заметны в конструкциях, где наиболее полно реализуются свойства армирующих волокон. Прочность и жесткость композитов, отнесенные к плотности материала, зависят от схемы армирования и принимают максимальные значения для продольного направления однонаправленного материала. Поэтому наибольший эффект может быть достигнут в тех изделиях, где можно применять почти однонаправленное армирование (шест для прыжков, лук, рессора, арматура бетона), или когда усилия направлены вдоль волокон (сосуды давления, криволинейное армирование вдоль траекторий главных напряжений). Основная потеря эффективности, как правило, связана с местами крепления, и для их оптимального проектирования необходимы комплексные прорывные решения, связанные с компьютерным моделированием и аддитивными технологиями, основанными на использовании специальных 3D принтеров, позволяющих плести волокнистые конструкции по заданным траекториям.

Разветвленные композитные упругие элементы

В записных книжках Леонардо да Винчи было обнаружено наблюдение: «Сумма квадратов диаметров ветвей одинакова до и после ветвления», что означает сохранение суммарной площади сечений. Действительно, если

«механистически» представить древесные волокна трубочками постоянного диаметра, которые, не прерываясь «разбегаются» от ствола по ветвям, то в такой упрощенной модели число «волокон» и их суммарная площадь должны быть одинаковы в любом сечении кроны дерева.

«Правило Леонардо» соответствует разветвленной композитной структуре с непрерывными волокнами, преимущества которой, по сравнению с профилированной балкой «констэра» (*constant area*), определяются возможностью сохранить равнонапряженность и прочность волокон благодаря однонаправленному армированию в «ветвях» с уменьшением ширины балки при замене ее пучком «ветвей».

Ниже рассмотрены модели упругих элементов в виде ветвящихся стержней, работающих на изгиб и призванных запасать заданную упругую энергию при сохранении несущей способности. Требования по энергии и по прочности противоречивы: для повышения прочности надо увеличивать поперечное сечение, а для роста накопленной энергии – снижать, повышая податливость. Чтобы удовлетворить обоим требованиям, приходится в традиционной многолистовой рессоре увеличивать число листов, либо применять равнопрочное профилирование в малолистовой рессоре [2], либо использовать ветвление композитной структуры по аналогии с кроной дерева [4].

Для сохранения наглядности все приведенные ниже расчеты проводятся в балочном приближении: прогиб и прочность оцениваются через нормальные, продольные напряжения. В различных волокнистых (однонаправленных) композитах прочности на растяжение и сжатие, естественно, различаются. Для органопластиков прочность на сжатие существенно меньше, чем на растяжение, для боропластиков – наоборот, для стекло- и углепластиков – бывает по-разному. В приведенном балочном приближении смещение нейтральной оси из-за «бимодульности» не рассматривалось, и формально наибольшие растягивающие и сжимающие напряжения считались одинаковыми, сравнивая их с наименьшим из пределов прочности: на растяжение или на сжатие.

Полимерные композиты обладают низкими межслойными сдвиговыми характеристиками, поэтому надо учитывать поправку к прогибу за счет межслойных сдвигов и возможность разрушения под действием касательных напряжений.

В обычной балке с пролетом l , высотой w и шириной сечения t , нагруженной на трехточечный изгиб силой P , наибольшие нормальные и касательные напряжения рассчитываются по известным формулам

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{2} \frac{Pl}{wt^2}; \quad \tau_{\max} = \frac{3}{4} \frac{P}{wt} \Rightarrow \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} = \frac{t}{2l},$$

из которых следует, что расслоение от сдвигов происходит только в весьма коротких балках $l \leq \frac{t\sigma_*}{2\tau_*} \approx 10 \div 12t$; (σ_* , τ_* – пределы прочности по нормальным и касательным напряжениям). Поэтому в дальнейших модельных задачах для длинных «ветвей» возможность расслоения не рассматривается. То же относится и к учету поправки к прогибу от межслойных сдвигов:

$$v = v_1 + v_2 = \frac{Pl^3}{4Ewt^3} + \frac{6Pl}{20Gwt} = v_1 \left(1 + \frac{6Et^2}{5Gl^2} \right).$$

При отношении продольного модуля Юнга E к модулю межслойного сдвига G стеклопластика порядка пяти, поправка к прогибу не превышает 1 % для достаточно длинных балок $l/t > 20$.

Ветвление упругого стержня с круговым сечением

В качестве наглядной модели ветвления рассмотрим консольную балку (рис. 1) длиной l и диаметром d , нагруженную переменным изгибающим моментом:

$$M(\bar{x}) = M(1)\bar{x}^\gamma; \quad \bar{x} = x/l. \quad (1)$$

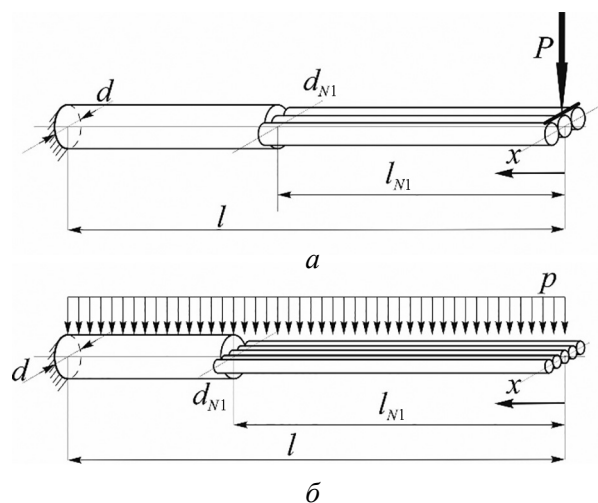


Рис. 1. Схемы равнопрочного ветвления по Леонардо на три или пять «ветвей» при воздействии концевой силы (а) или распределенной нагрузки (б)

Перерезывающая сила выражается производной от момента: $P(x) = dM/dx$, а распределенная нагрузка – производной от перерезывающей силы: $p(x) = dP/dx$, поэтому нагружение концевой силой соответствует $\gamma = 1$, равномерная нагрузка – $\gamma = 2$, линейно меняющаяся распределенная нагрузка – $\gamma = 3$ и т.д.

На некотором расстоянии l_{N1} от конца цилиндр разветвился на N одинаковых стержней с сохранением суммарной площади сечений, согласно правилу Леонардо:

$$\bar{d}_{N1} = d_{N1}/d = 1/\sqrt{N}. \quad (2)$$

Здесь d_{N1} – диаметр каждой из одинаковых ветвей; первый нижний индекс означает число ветвей, второй – номер узла ветвления – в данном случае – первый и единственный. Расстояние l_{N1} выбирается из условия равных максимальных напряжений в корневом сечении $\bar{x} = 1$ и в каждой из N ветвей в месте разветвления:

$$\frac{M(1)}{\pi d^3} = \frac{M(\bar{l}_{N1})}{N\pi d_{N1}^3} \Rightarrow N\bar{d}_{N1}^3 = \bar{l}_{N1}^3; \quad \bar{l}_{N1} = \frac{l_{N1}}{l} \Rightarrow$$

$$\text{из (1), (2)} \quad \bar{l}_{N1} = N^{-1/2\gamma}. \quad (3)$$

Покажем, как изменится накопленная упругая энергия после ветвления:

$$U_{N1} = \frac{M^2(1)l}{2E} \left\{ \frac{1}{I_{N1}} \int_0^{\bar{l}_{N1}} \bar{x}^{2\gamma} d\bar{x} + \frac{1}{I} \int_{\bar{l}_{N1}}^1 \bar{x}^{2\gamma} d\bar{x} \right\} =$$

$$= U_0 \delta_U; \quad U_0 = \frac{M^2(1)l}{2EI(1+2\gamma)}; \quad (4)$$

$$\delta_U = [1 + (N-1)\bar{l}_{N1}^{1+2\gamma}];$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64}; \quad I_{N1} = N \frac{\pi d_{N1}^4}{64} = \frac{I}{N}.$$

Согласно соотношению (3):

$$\delta_U = 1 + \frac{N-1}{N^\lambda} \xrightarrow{N \rightarrow 1; N \rightarrow \infty} 1. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что ветвление не дает преимуществ ни для тривиального случая ($N=1$), ни для большого числа «ветвей», так как $\frac{1+2\gamma}{2\gamma} = \lambda > 1$, значит, существует число ветвей, на которое наиболее «выгодно» разветвиться для повышения накопленной энергии. Из условия максимума зависимости (5) для δ_U находим оптимальное число «ветвей»:

$$\frac{d\delta_U}{dN} = 0 \Rightarrow \frac{1}{N^\lambda} = \frac{\lambda(N-1)}{N^{1+\lambda}} \Rightarrow N_{opt} = \frac{\lambda}{\lambda-1}. \quad (6)$$

Чтобы не усложнять дальнейшие алгебраические выкладки, остановимся только на двух практически важных случаях: $\gamma = 1$; $\lambda = 3/2$ – нагружение концевой силой и $\gamma = 2$; $\lambda = 5/4$ – распределенная, «ветровая» нагрузка. Для этих двух случаев из соотношения (6) максимум накопленной энергии при сохранении равнонапряженности соответствует ветвлению на целое число веток: на три и на пять, соответственно.

При $N = 3$; $\bar{l}_{31} = 1/\sqrt{3} \Rightarrow U_{31}/U_0 = 1 + 2/3^{3/2} \approx 1,38$. Это – при нагружении концевой силой – наибольший коэффициент увеличения накопленной упругой энергии для одного ветвления с сохранением равнопрочности и площади сечений. При $N = 5$; $\bar{l}_{51} = 5^{-1/4} \Rightarrow U_{51}/U_0 = 1 + 4/5^{1/4} \approx 3,67$. То есть, эффективность равнопрочного ветвления растет с увеличением скорости изменения изгибающего момента. Для «ветровой» распределенной нагрузки оптимальное ветвление дает гораздо больший эффект, чем в случае концевой силы.

Если продолжить процесс ветвления на оптимальное число $N_{opt}, N_{opt}^2, N_{opt}^3, \dots, N_{opt}^n$ ветвей в точках, соответствующих равнопрочности, то после интегрирования типа (4) по многим участкам получим сходящийся ряд для вычисления накопленной энергии. Чтобы не выписывать громоздких формул, остановимся на тех же двух «оптимальных» случаях.

1. Концевая сила: $\gamma = 1$; $N = 3$,

$$U_{Nn} = U_0 \left[1 + \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{N-1}{N^{1+1/2\gamma}} \right\} \right] =$$

$$= U_0 \left[1 + \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{3}^i} \right]. \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой сумму геометрической прогрессии с начальным членом $a_1 = 2/(3\sqrt{3})$ и знаменателем $q = 1/\sqrt{3}$. Сумма членов этой прогрессии: $a_1(1-q^n)/(1-q)$. При неограниченном росте числа «равнопрочных» ветвлений на три ветви коэффициент накопленной энергии δ_U стремится к конечному пределу:

$$\delta_U = \frac{U_{3n}}{U_0} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 + \frac{a_1}{1-q} = 1 + \frac{2}{3(\sqrt{3}-1)} \approx 1,91.$$

Это – наибольший коэффициент увеличения накопленной энергии, который можно получить при многократном ветвлении на три одинаковые ветки. Чтобы повысить накапливаемую энергию (прогиб), надо между узлами ветвлений равнопрочно изменять размеры сечения «веток» с сохранением площади сечения.

2. Для равномерной нагрузки: $\gamma = 2$; $N = 5$ ряд (7) примет вид геометрической прогрессии

$$U_{5n} = U_0 \left[1 + \frac{4}{5} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt[4]{5^i}} \right]$$

с начальным членом $a_1 = 4/\sqrt[4]{5}$ и знаменателем $q = 1/\sqrt[4]{5}$, сумма членов которой с ростом числа ветвлений стремится к большему пределу, чем в случае концевой силы: $\delta_U = U_{5n}/U_0 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 + 4/\left[5\left(\sqrt[4]{5} - 1\right)\right] \approx 2,5$.

Формально можно оценить предельное значение коэффициента δ_U для непрерывного (фрактального, дробного) ветвления, представив постоянно меняющимся нецелое число N ветвей с сохранением суммарной площади (2). Это эквивалентно равнопрочному изменению момента инерции: $N(\bar{x}) = (d/d(\bar{x}))^2 \Rightarrow I(\bar{x}) = N(\bar{x})I \times (d(\bar{x})/d)^4 = I/N(\bar{x})$. Из условия равнонапряженности (3): $N(\bar{x}) = \bar{x}^{-2} \Rightarrow I(\bar{x}) = IN^{-1}(\bar{x}) = I\bar{x}^{2\gamma}$. Из соотношения (4) определим возрастание упругой энергии под действием переменного момента во фрактально разветвленной, равнопрочной «пружине», сохраняющей прежний суммарный объем:

$$U_{N(\bar{x})} = \frac{M^2(1)l}{2E} \int_0^1 \frac{\bar{x}^{2\gamma}}{I(\bar{x})} d\bar{x} = \frac{M^2(1)l}{2EI} = (1 + 2\gamma)U_0. \quad (8)$$

Таким образом, согласно (8), «идеально» ветвящийся стержень может при сохранении объема (массы) в случае нагружения сосредоточенной силой накапливать втрое большую упругую энергию, чем однородный цилиндрический, а при распределенной нагрузке – в 5 раз большую.

Ветвление упругого стержня с квадратным сечением (индекс r) со стороной t рассматривается точно также, как с круговым (индекс c), с точностью до замены коэффициентов в формулах для площади сечения S , момента сопротивления W и момента инерции I :

$$S_c = \pi d^2/4 \rightarrow S_r = t^2; W_c = \pi d^3/32 \rightarrow W_r = t^3/6; I_c = \pi d^4/64 \rightarrow I_r = t^4/12. \quad (9)$$

Ветвление с равнопрочным изменением размеров эллиптического и прямоугольного сечений

Фрактальное (непрерывное) ветвление нельзя реализовать, и оно рассмотрено как предельный случай, но этого предельного повышения упругой энергии (8) можно достичь, создавая равнопрочное изменение размеров эллиптических сечений между узлами ветвления с сохранением суммарной площади сечений. Ветвление позволит уменьшить суммарную ширину пучка ветвей по сравнению с монолитной балкой и получить в каждой ветви почти однонаправленное армирование (рис. 2).

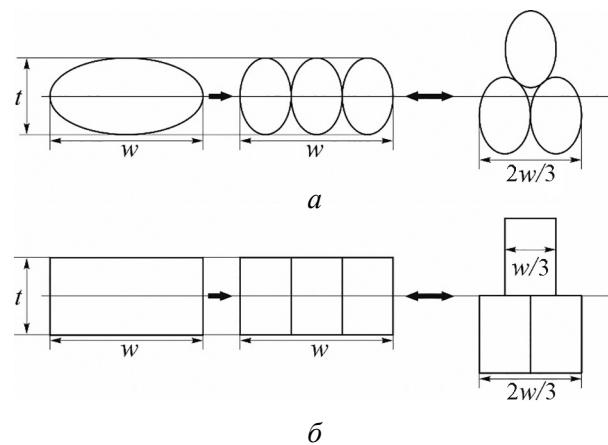


Рис. 2. Иллюстрация ветвления стержня с эллиптическим (а) и прямоугольным (б) сечениями

Чтобы сохранить суммарные значения площади S , момента сопротивления W и момента инерции I в месте ветвления, надо просто сохранить текущую толщину t и суммарную ширину w сечений. Предположим, стержень эллиптического сечения с шириной w и толщиной t разветвился на N ветвей, возможно, разной ширины, но одинаковой высоты. Индексами (-) и (+) пометим размеры до и после ветвления. Выпишем подобные (9) формулы для площади и моментов до и после ветвления:

$$\begin{aligned} t^- &= t^+; w^- = \sum_{i=1}^N w_i^+ = w^+ \Rightarrow S^- = \\ &= \frac{\pi w^- t^-}{4} = S^+ = w^+ t^+; \\ W^- &= W^+ = \frac{\pi w^+ t^{+2}}{32}; I^- = I^+ = \frac{\pi w^+ t^{+3}}{64}. \end{aligned} \quad (10)$$

Удобно проводить ветвление, когда ширина становится кратной (например, трехкратной) высоте, и тогда эллиптическое сечение можно разбить на три круговых с диаметром, равным текущей высоте, и с сохранением площади и моментов: сопротивления и инерции.

Для ветвления листовой равнопрочной пружины с прямоугольным сечением ситуация оказывается совершенно аналогичной ветвлению стержня с эллиптическим сечением. Для равнопрочного ветвления балки констэра применима тривиальная процедура: в любом месте можно продольно разрезать балку на произвольное число «ветвей» с прямоугольным или квадратным сечением, сохраняя при этом текущую толщину и суммарную ширину балки. Для определенности можно проводить продольное ветвление там, где ширина становится кратной высоте, например, ширина больше толщины в три раза (см. рис. 2, б). Тогда прямоугольное сечение будет переходить в три квадратных, и вновь образованные стержни можно собирать в пучок, уменьшая при этом габариты по ширине.

В качестве примера возможного снижения массы упругого элемента из стеклопластика отметим изготовление в НАМИ и в ВИАМ на основе расчетов ИМАШ профилированной однолистовой рессоры для ГАЗ-24 («Волга» – ныне ГАЗ-31 10). Стальной прототип при длине 1397 мм состоял из пяти стальных листов толщиной 6 мм и шириной 65 мм. Заданная жесткость 2 кг/мм, статическая нагрузка 400 кг, максимальная 600 кг. Масса стального прототипа задней рессоры в сборе составляла 18 кг. Композитный аналог с вмотанными стальными ушками весил 2,7 кг. Мы не ставили себе целью подробно разбирать технологию изготовления стеклопластикового листа с параболическим изменением толщины, а также результаты стендовых и полевых испытаний. Технологических и инженерных проблем остается много, но задача данного примера – показать потенциальные преимущества квази-однонаправленного стеклопластика для создания упругих элементов – накопителей энергии.

Заключение

Проведенный анализ оказал, что на разветвленных пружинах наблюдаются прямой, технологический и конструкционные эффекты применения композитов. Это позволяет получать более легкие изделия по сравнению

со стальными аналогами благодаря низкой плотности и меньшему модулю упругости стеклопластиков, значительно снижать энергозатраты при изготовлении профилированных и ветвящихся элементов методами пултрузии и пулформинга, а также уменьшать габариты пучка ветвей по сравнению с широкой балкой «констэра» при сохранении однонаправленного армирования непрерывными волокнами.

Список литературы

1. Малахов А.В., Полилов А.Н. Построение траекторий волокон, огибающих отверстие, и их сравнение со структурой древесины в зоне сучка // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 57–62.
2. Полилов А.Н., Плитов И.С., Тамусь Н.А. Компьютерное моделирование рациональной структуры криволинейного армирования профилированных композитных элементов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 4. С. 73–79.
3. Полилов А.Н., Тамусь Н.А. Биомеханика прочности волокнистых композитов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 328 с.
4. Полилов А.Н., Тамусь Н.А. Проектирование разветвляющихся или профилированных композитных элементов по аналогии со структурой кроны дерева // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 6. С. 76–84.
5. Harte A.-M., Fleck A. Deformation and failure mechanisms of braided composite tubes in compression and torsion // Acta Mater., 2000. Vol. 48. P. 1259–1271.
6. Malakhov A.V., Polilov A.N. Design of composite structures reinforced curvilinear fibres // Composites: Part A. 2016. Vol. 87. P. 23–28.
7. Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures / A. Spickenheuer, M. Schulz, K. Gliesche, G. Heinrich // Plast. Rubber Compos. – Macromol. Eng., 2008. Vol. 37. No. 5. P. 227–232.
8. Полилов А.Н. Этюды по механике композитов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 320 с.
9. Mattheck C. Design in Nature: Learning from Trees. Springer; 1998.
10. Губенко Л.А., Хандов М.Г. Оценка прочности на растяжение деревянных элементов при наличии сучков // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2015. № 1 (343). С. 103–107.

11. Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов (2-е издание). Учебное пособие для технических университетов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 375 с.
12. Huang J., Haftka R.T. Optimization of fiber orientation near a hole for increased load-carrying capacity of composite laminates // Struct. Multidisc. Optim., 2005. Vol. 30. P. 335–341.
13. 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.
14. Плитов И.С., Полилов А.Н. Рациональные размеры звена бамбука и композитной трубы, подверженной сжатию, изгибу и кручению // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 3. С. 58–69.
15. 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.
16. Eloy C. Leonardo's rule, self-similarity and wind-induced stresses in trees // arXiv: 1105.2591v2 [physics. Bio-ph]. 15 Nov. 2011.
17. Minamino R., Tateno M. Tree branching: Leonardo da Vinci's rule versus biomechanical models // Minamino R, Tateno M (2014) Tree Branching: Leonardo da Vinci's Rule versus Biomechanical Models. PLOS ONE 9(4): e93535. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093535>.
18. Schulgasser K., Witzum A. On the strength of herbaceous vascular plant stems // Annals of Botany, 1997. Vol. 80. P. 35–44.
19. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. Санкт-Петербург, Изд-во Питер, 2015. 348 С.
20. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров. М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

ПОЛИЛОВ
Александр Николаевич
E-mail: polilov@imash.ru
Тел.: (499) 135-34-30

Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией безопасности и прочности композитных конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. Сфера научных интересов: механика композитных материалов. Автор более 100 научных публикаций.

ТАТУСЬ
Николай Алексеевич
E-mail: nikalet@mail.ru
Тел.: (499) 135-77-51

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории безопасности и прочности композитных конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. Сфера научных интересов: механика композитных материалов. Автор более 50 научных публикаций.