

## Поиск оптимальных конструктивных параметров направляющих элементов подвески автомобиля класса «Формула студент»

Евсеев К.Б., к.т.н. Карташов А.Б.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
kb@baumanracing.ru

*Аннотация.* В статье приведены результаты исследования прочности углепластикового рычага подвески гоночного автомобиля класса «Формула студент». Рассмотрен процесс поиска оптимальных решений конструктивных параметров направляющих элементов подвески, а именно: количества слоев армирующего материала и направления армирования. На основании полученных результатов устанавливаются оптимальные конструктивные параметры. В результате расчета получены диаграммы, иллюстрирующие распределение запаса прочности по рычагу в зависимости от угла армирования и толщины композита.

*Ключевые слова:* гоночный автомобиль (racing car), подвеска (suspension), композиционные материалы (composites).

В настоящее время композиционные материалы получили широкое распространение в качестве альтернативных конструкционных материалов в узлах и агрегатах автомобиля. В частности, применение современных композиционных материалов в элементах подвески автомобиля позволяет существенно улучшить её эксплуатационные характеристики: увеличить жесткость направляющих элементов, уменьшить неподрессоренную массу, повысить надежность. Из современных композиционных материалов, обладающих малой плотностью, в которых наилучшим образом сочетается высокий уровень прочностных свойств с технологичностью изготовления изделия можно выделить полимерные композиционные материалы, упрочнённые углеродными волокнами или углепластики.

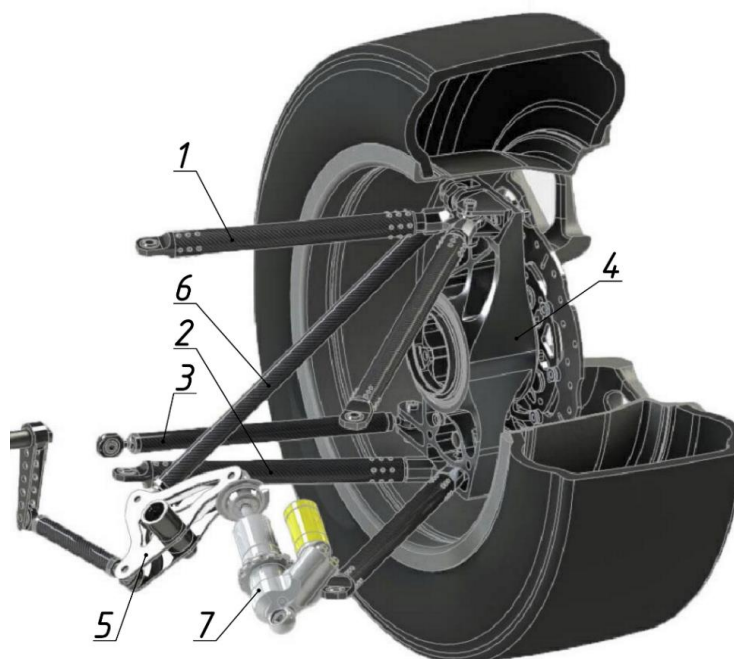
В статье приведено описание и результаты исследований, целью которых является уменьшение неподрессоренной массы, сохранение необходимой прочности и жесткости, путем поиска оптимальных конструктивных параметров элементов подвески гоночного автомобиля класса «Формула студент», представленного на рисунке 1, выполненных с применением углепластиков.



Рисунок 1. Гоночный автомобиль класса «Формула студент»

Подвеска гоночного (рисунок 2) автомобиля класса «Формула студент» полной массой 320 кг состоит из следующих основных элементов: верхний (1) и нижний (2) А-образные рычаги, реактивная тяга (3), стойка (4), маятник (5), тяга маятника (6) и упругодемпфирующий

элемент (7).



**Рисунок 2. Вид подвески гоночного автомобиля класса «Формула студент»**

Для данного класса автомобилей примем следующие характерные нагрузочные режимы подвески: движение в повороте с максимальным нормальным ускорением, тормозной и тяговый режимы. С целью определения силовых факторов, возникающих в элементах подвески при выбранных нагрузочных режимах, был выбран метод конечных элементов.

По результатам анализа [5] полученных значений силовых факторов можно выделить нижний рычаг подвески, который является наиболее нагруженным. Сила возникает в шарнирном соединении нижнего рычага со стойкой.

Нижний рычаг подвески представляет собой А-образный углепластиковый рычаг, состоящий из двух углепластиковых трубок с алюминиевыми наконечниками, в которых установлены сферические подшипники скольжения. Наиболее технологичным способом изготовления углепластикового рычага является клепаное соединение трубки с наконечниками (рисунок 3). Углепластиковые трубки изготавливаются методом намотки углеволокна на оправку, которая после процесса полимеризации удаляется [2].



**Рисунок 3. Углепластиковый рычаг**

Необходимо отметить, что расчет конструкции рычага из композиционного материала является сложной инженерной задачей, связанной с анизотропностью свойств углепластика, армированного непрерывными нитями под заданным углом. Основные трудности заключа-

ются в учете особенностей структуры материала, а именно: количества слоев армирующего материала и направления армирования.

Для определения прочностных свойств предлагается использовать программный комплекс конечно-элементного анализа Altair HyperWorks, который содержит модуль подготовки конечно-элементной модели с учетом особенностей анизотропных свойств армированных материалов. Кроме того, программный комплекс Altair HyperWorks позволяет сформулировать целевую функцию используя несколько выходных параметров модели одновременно, путем применения взвешенного аддитивного критерия.

Элементарный слой однонаправленного углепластика имеет следующие упруго-прочностные характеристики [2]: прочность при растяжении вдоль и поперек волокон – 780 МПа и 18 МПа соответственно; предел прочности при сжатии вдоль и поперек волокон – 580 МПа и 130 МПа соответственно; модуль упругости вдоль и поперек волокон – 145 ГПа и 9 ГПа соответственно; модуль сдвига – 4,5 ГПа.

Для проведения конечно-элементного анализа выбрана углепластиковая трубка рычага, которая подвержена наибольшему силовому воздействию [5]. Создана объемная конечно-элементная (КЭ) модель, изображенная на рисунке 4, которая состоит из 4961 оболочечных конечных элементов.

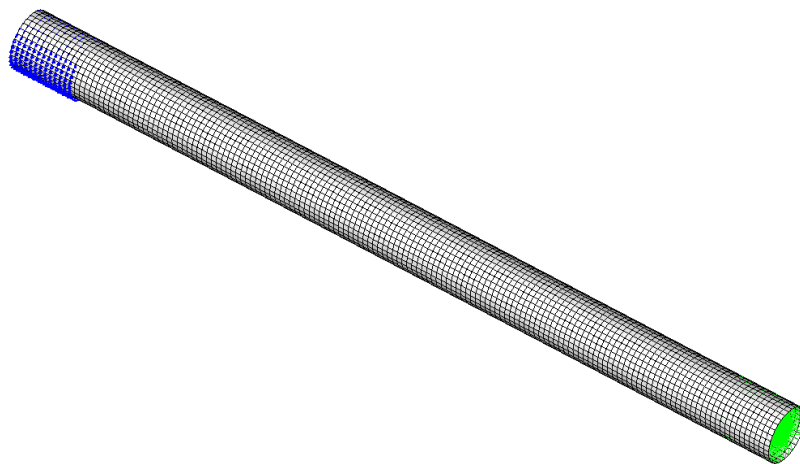


Рисунок 4. КЭ модель углепластиковой трубки

К КЭ модели трубки с одной стороны приложены эквивалентные силовые факторы, соответствующие каждому нагрузочному режиму [5] с коэффициентом динамичности 2,5 [1], с другой стороны трубки ограничены первые три поступательные степени свободы.

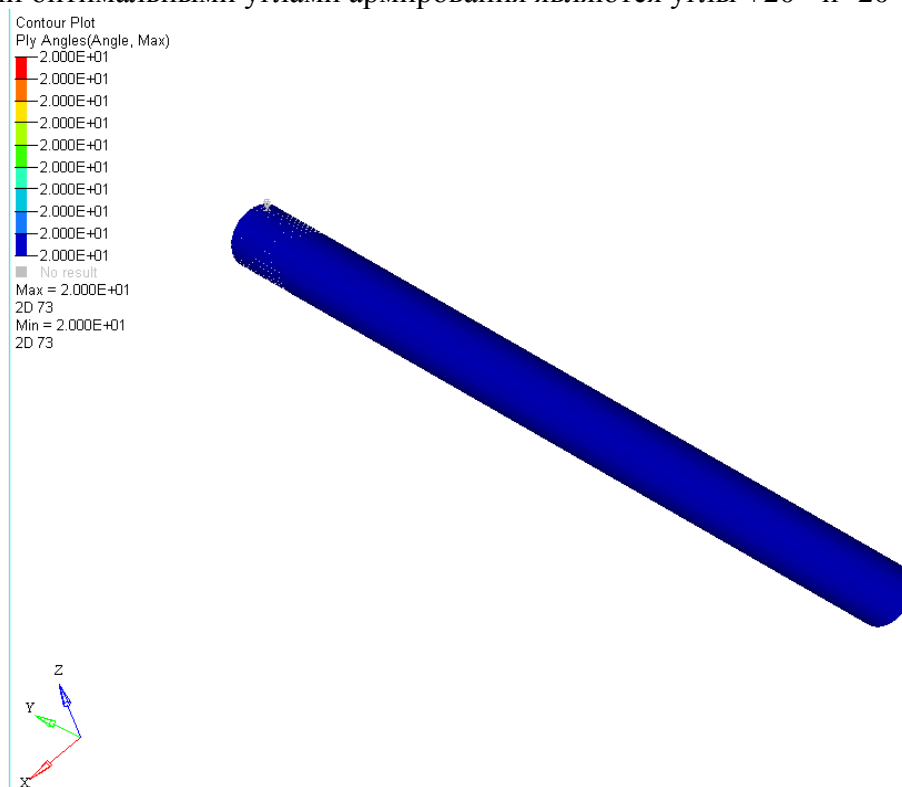
Ply lay-up: NewLaminate1						
Total number of plies: 6						
Total thickness: 3.0						
		Ply	Material	Thickness T1	Orientation Degrees	
		1	Carbon	0.5	89	
		2	Carbon	0.5	-89	
		3	Carbon	0.5	89	
		4	Carbon	0.5	-89	
		5	Carbon	0.5	89	
		6	Carbon	0.5	-89	

Рисунок 5. Задание слоев композита

В модуле HyperLaminate, который втронен в Altair HyperWorks, происходит задание структурных особенностей армирования углепластикового материала: указываются направления армирования и назначается количество слоев (рисунок 5). Затем выбираются варьируемые параметры – углы армирования. В качестве первого приближения задается угол армирования  $+89^\circ$  и  $-89^\circ$  к оси трубки, исходя из технологических возможностей оборудования выбирается минимальный угол армирования  $-20^\circ$ , а также задается минимальный шаг изменения угла армирования  $-0,5^\circ$ .

При проведении расчета в качестве целевой функции выбрана максимальная жесткость конструкции. Целевая функция формируется с использованием взвешенного аддитивного критерия, в котором для каждого нагрузочного режима задаются соответствующие весовые коэффициенты. В данном случае для всех нагрузочных режимов используется единый весовой коэффициент. Таким образом, все три нагрузочных режима являются равнозначными.

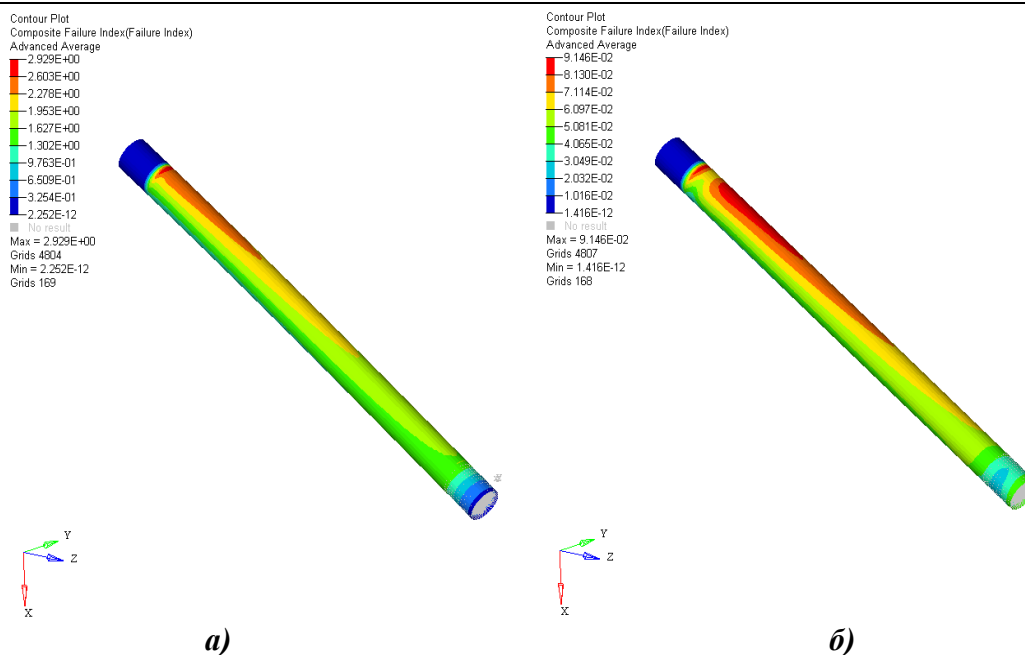
По результатам проведения оптимизации (рисунок 6) с точки зрения общей жесткости конструкции оптимальными углами армирования являются углы  $+20^\circ$  и  $-20^\circ$ .



**Рисунок 6. Результаты проведения оптимизации**

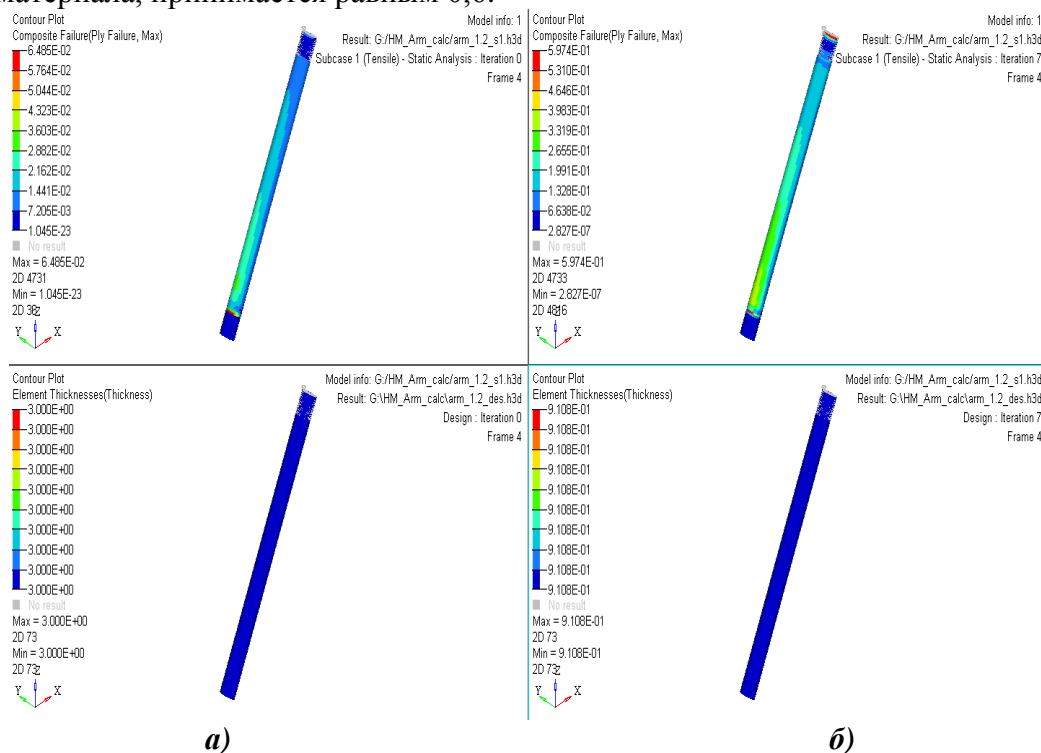
Для оценки несущей способности углепластикового рычага необходимо использовать критерии разрушения композиционного материала, учитывающие анизотропные свойства армированных пластиков. В Altair HyperWorks возможно проводить оценку прочности конструкций из композиционных материалов, используя один из нескольких критериев разрушения: критерий максимальных напряжений, критерий Цая-Ву, критерий Хилла и критерий Хоффмана [4]. В каждом слое углепластикового элемента определяется наиболее поврежденный слой и проводится оценка прочности по перечисленным критериям разрушения, затем по результатам оценки прочности выбирается критерий, по которому получились максимальные повреждения (рисунок 7).

До начала оптимизации при направлении армирования  $+89^\circ$  и  $-89^\circ$  произойдет разрушение композита, т.к. коэффициент учитывающий степень повреждений больше единицы, при этом максимальные повреждения наблюдаются в результате применения критерия разрушения Цая-Хилла [4]. С учетом результатов оптимизации при изменении направления армирования на углы  $+20^\circ$  и  $-20^\circ$  к оси трубки повреждения слоев углепластикового рычага, имеют значения на порядок меньшие, т.е. несущая способность рычага возрастает. В данном случае композит не разрушается.



**Рисунок 7. Значения функции критериев разрушения: *a* – перед началом проведения оптимизации; *б* – после завершения оптимизации**

После определения оптимального направления армирования композиционного материала необходимо определить толщину намотки. В данном случае в качестве целевой функции используется объем композиционного материала, который минимизируется. Чтобы разрушения материала не происходило необходимо задать ограничение по предельному значению функции критериев разрушения с некоторым запасом. В данном случае для элементов подвески гоночного автомобиля значение коэффициента запаса выбирается равным 1,5 [1]. Функция критериев разрушения является обратной величиной, поэтому для проведения оптимизации предельное допустимое значение коэффициента, отражающего степень повреждения материала, принимается равным 0,6.



**Рисунок 8. Значения функции критериев разрушения и толщина материала: *a* – перед началом проведения оптимизации; *б* – после завершения оптимизации**

Результаты расчета приведены на рисунке 8. Перед проведением оптимизации толщина материала составляла 3мм, при этом коэффициент, отображающий степень повреждения композиционного материала, был равен 0,065. После завершения оптимизации была найдена минимальная толщина материала – 0,9мм, соответствующая коэффициенту повреждения материала равному 0,6.

Таким образом, в результате проведенных исследований сделана оценка прочности с учетом коэффициента динамичности углепластикового рычага подвески гоночного автомобиля класса «Формула студент». Для учета особенностей армированного композиционного материала проведена оценка прочности углепластикового рычага в модуле Altair HyperWorks и получена диаграмма, показывающая распределение запаса прочности в конструкции по критериям разрушения. Установлены оптимальные углы армирования – +20° и -20°, при которых несущая способность рассматриваемой конструкции увеличивается на порядок. Найдена минимальная допустимая толщина намотки композиционного материала. В результате оптимизации конструктивных параметров общая масса углепластиковой трубки снижена более чем в 3 раза.

Работа выполнена в рамках договора № 9905/17/07-к-12 между ОАО «КамАЗ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### Литература

1. Проектирование полноприводных колесных машин: в 3 т. Учеб. для вузов / Б.А. Афанасьев др.; Под общ. ред. А.А. Полунгяна. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008.
2. Афанасьев Б.А., Даштиев И.З. Проектирование элементов автомобиля из полимерных композиционных материалов: Учеб. пособие / Под ред. Б.А. Афанасьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
3. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов: Учеб. для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 592 с. (Сер. Механика в техническом университете; Т.2)
4. Pedro P. Camanho Failure criteria for fibre-reinforced polymer composites. URL: <http://paginas.fe.up.pt/~stpinho/teaching/feup/y0506/fcriteria.pdf> (дата обращения 9.12.14).
5. Евсеев К.Б. «Анализ механических свойств углепластиковых направляющих элементов подвески автомобиля класса «Формула студент» // Молодежный научно-технический вестник. – 2013. № 10. – С. 11.

### **Расчетно-экспериментальный метод определения конструктивного облика колесных вставок безопасности**

Еремин Г.П., к.т.н. доц. Карташов А.Б., к.т.н. доц. Смирнов А.А.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
[eremingeorgy@mail.ru](mailto:eremingeorgy@mail.ru); [kartashov@bmstu.ru](mailto:kartashov@bmstu.ru)

*Аннотация.* В статье предложен метод создания колёсных вставок безопасности (внутренних опор или упоров) для военной и гражданской колёсной техники. Ключевые положения метода проиллюстрированы на примере разработанной конструкции вставки безопасности.

*Ключевые слова:* колесный движитель, вставка безопасности, шина с внутренним упором, шина с внутренней опорой.

Современная пневматическая шина представляет собой сложную многослойную композиционную конструкцию, основным недостатком которой является низкая надежность, вызванная высокой вероятностью повреждения герметичной газонаполненной оболочки в процессе эксплуатации автомобиля. Это обстоятельство снижает безопасность и общую надежность современных автомобилей. Кроме того, конструкция обладает повышенной уязвимостью к поражению пулями, осколками снарядов или брони, что резко снижает подвиж-