

УДК 629.32:539.384

## ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ РАМЫ СОЛНЦЕКАТА «ТУРИСТ» ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Поливанов А.А., Галушак В.С.

*<sup>1</sup>Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Камышин, e-mail: polivanov@kti.ru*

В данной работе излагается методика расчета на прочность рамы солнцеката «Турист». Рассмотрены особенности изготовления рамы средства и ее основные характеристики. Для проведения прочностных расчетов выбран программный комплекс ANSYS. В качестве модели материала была выбрана билинейная модель пластичности с кинематическим упрочнением, а в качестве условия пластичности – критерий Мизеса. Рама считалась жестко закрепленной в точках крепления переднего колеса и элементов задней подвески. В процессе моделирования задавалась статическая нагрузка в диапазоне от 50 до 250 кг. В ходе анализа результатов расчетов были выявлены участки рамы, в которых возникают наиболее значительные деформации изгиба. При этом максимальная расчетная статическая нагрузка, при которой в раме возникают только обратимые деформации, составляет 172,5 кг, а потеря устойчивости и разрушение рамы происходит при нагрузке 228 кг. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации по повышению жесткости рамы солнцеката «Турист», которые предусматривают дополнительное усиление слабых мест. Кроме этого, в статье сформулирован план дальнейших исследований, которые предполагают расчет рамы в динамической постановке, а также использование других конструкционных материалов.

**Ключевые слова:** электровелосипед, солнцекат, возобновляемые источники энергии, проектирование транспортных средств

## STRENGTH CALCULATION OF THE FRAME OF SOLAR-ELECTRIC-MOBILE «TOURIST» UNDER STATIC LOADING

Polivanov A.A., Galuschak V.S.

*Reader of Kamyshin Technological Institut (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: polivanov@kti.ru*

This work describes research methods of strength calculating of the frame of solar-electric-mobile «Tourist». The peculiarities of the frame manufacture and its main characteristics was considered. For conduct strength calculations was selected the ANSYS tools. As a material model was chosen as the bilinear model of plasticity with kinematic hardening, and as a plasticity condition was chosen von Mises criterion. The frame was considered rigidly fixed at the points of attachment of the front wheel and elements of the rear suspension. In the modeling process were asked static load range from 50 to 250 kg. The analysis of calculations results revealed the areas of the frame that are experiencing the most significant bending deformation. The maximum calculated static load at which the frame occurs only reversible deformation, is 172,5 kg, and the loss of stability and destruction of the frame is under load 228 kg. On the basis of the obtained results was formulated recommendations for enhancing the rigidity of the frame of the solar-electric-mobile «Tourist», which provide for additional strengthening of weak points. In addition, the article formulates a plan for further research, which involves the calculation of the frame in a dynamic setting, as well as the use of other structural materials.

**Keywords:** the electric bike, solar-electric-mobile, renewable energy, engineering vehicles

В настоящей статье представлены основные результаты, полученные авторами в ходе выполнения прочностных расчетов рамы транспортного средства «Солнцекат «Турист»» [1, 2]. Он представляет собой одноместный туристический электровелосипед, работающий на солнечных батареях и аккумуляторной тяге. Изготавливается солнцекат силами сотрудников и студентов Камышинского технологического института (филиала) ВолГТУ (г. Камышин, Волгоградская обл.). «Турист» способен ехать без усилий водителя весь световой день и до 35 км в темное время суток [1, 2]. Так, в сентябре 2016 г. первый прототип солнцеката участвовал в велопробеге по маршруту «Волгоград – Севастополь» общей протяженностью 1350 км и в настоящее время проходит испытания. Не вызывает сомне-

ния, что транспортные средства такого типа, выполненные в различных конструктивных исполнениях, будут чрезвычайно востребованы в будущем.

В предыдущей работе [3] авторами были сформулированы задачи, которые требуется выполнить для формирования технического облика солнцеката «Турист». Особенности формирования технического облика транспортных средств подробно рассмотрены в работе [4]. Одной из первых задач, подлежащих рассмотрению, является определение прочностных характеристик рамы солнцеката и подготовка рекомендаций по ее оптимальному проектированию.

Цель исследования: проведение серии прочностных расчетов рамы солнцеката «Турист» при статической нагрузке и разра-

ботка соответствующих рекомендаций при проектировании серийных образцов.

### Материалы и методы исследования

Для проведения прочностных расчетов выбран программный комплекс ANSYS, ввиду его универсальности и значительных возможностей по расчету стержневых систем. Кроме того, ANSYS позволяет проводить не только прочностные расчеты, но и вычислять собственные колебательные частоты, рассматривать предельные значения ударных нагрузок, устойчивость и многое другое. Следует отметить, что ANSYS достаточно широко применяется для прочностных расчетов конструктивных элементов транспортных средств, примером чему являются такие работы, как [5–8].

В общем случае конструктивные особенности рамы определяются типом транспортного средства, который будет на ней собран. Существенную роль, в том, как это транспортное средство будет вести себя на дороге, играют профиль и структура элементов, из которых изготовлена рама. Не менее важное влияние на характеристики оказывают и механические свойства материала, из которого изготовлены эти элементы. При этом рамы из одного и того же материала, имеющие разную геометрию, могут существенно различаться по своим характеристикам жесткости и прочности, и, наоборот, рамы одинаковой конструкции, но изготовленные из разных материалов, также могут иметь различные характеристики. Наконец, важное значение имеет способ соединения между собой различных элементов рамы (сварное, болтовое, шарнирное и т.д.).

В настоящее время в производстве рам велосипедов, автомобилей и других легких транспортных средств используются следующие материалы:

- различные типы марок стали;
- алюминиевые сплавы;
- титановые сплавы;
- углепластик;
- карбон;
- редкие (магниевые, алюминий-скандиевые и бериллиевые) сплавы.

Рама прототипа солнцеката «Турист» была спроектирована и изготовлена опытным путем, без выполнения предварительных прочностных расчетов, то есть разработчики выбрали геометрию и материалы интуитивно. Такой способ проектирования, ко-

торый принято называть прототипированием, широко применялся ранее и в полной мере оправдывал себя, ввиду отсутствия специализированных программных комплексов для прочностных и иных расчетов. Сегодня же, когда такие возможности имеются, производители самой различной техники, прежде чем выпустить ее на рынок, проводят целый комплекс натурных и виртуальных испытаний, к которым относятся и прочностные расчеты. А поскольку натурные прочностные испытания рамы солнцеката не проводились, то количественные характеристики ее несущей способности к настоящему моменту неизвестны. Таким образом, определение несущей способности рамы солнцеката является важной и актуальной задачей. Эту задачу предполагается выполнить и авторам данной статьи.

Для изготовления основной рамы прототипа солнцеката «Турист» разработчиками был выбран профиль ГОСТ 30245-2003 из стали Ст3 размером 20\*20 мм квадратного сечения, а для нижней несущей части – 20\*40 мм прямоугольного сечения, толщиной 2 мм. Очевидно, что данный материал выбран разработчиками исходя из соображений его доступности и низкой стоимости, а также легкости обработки. Соединения в основном выполнены сварными, а в отдельных случаях – болтовыми. Независимо от этого, все соединения деталей рамы при построении геометрической модели принимались неразъемными. При этом однозначного ответа о пригодности данного материала для изготовления рамы солнцеката к настоящему моменту нет.

Таким образом, рама солнцеката «Турист» является цельным неразборным элементом (за исключением крепления переднего ведущего колеса и подвески задних колес, а также ручек рулевого управления). Кроме того, сверху к раме винтами прикреплен прозрачный обтекатель, изготовленный из листового поликарбоната толщиной 3 мм, который также обеспечивает дополнительную жесткость всей конструкции. Сверху на обтекатель наклеены три сегмента солнечной батареи. В данном расчете влияние обтекателя на прочность рамы в целом не учитывалось.

Далее перейдем непосредственно к прочностному расчету рамы солнцеката. Для его проведения необходимо произвести замеры всех участков рамы, и в последующем построить ее геометрической модель. Внешний вид геометрической модели, построенной средствами ANSYS, показан на рис. 1.

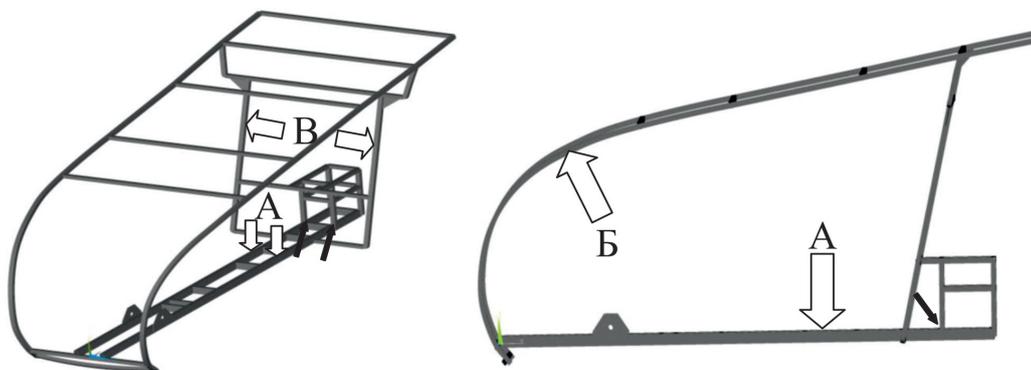


Рис. 1. Геометрическая модель рамы солнцеката

Модель состоит из 132 узлов и 180 ребер, проложенных между узлами, для которых выбран балочный элемент Beam189. Соединения крыши и остальной части рамы усилены четырьмя ребрами жесткости, для которых выбран четырехузловой тетраэдрический пространственный элемент Solid285. В реальной конструкции эти ребра выполнены из листовой стали Ст3 толщиной 3 мм и приварены к каркасу. Также с помощью элемента Solid285 образован узел крепления переднего колеса.

На данном рисунке не показаны элементы подвески и рулевого управления, расчет с их учетом будет проведен позже.

Для материала заданы следующие характеристики:

– модуль нормальной упругости: 200 ГПа;

– коэффициент Пуассона: 0,3;

– предел текучести: 240 МПа;

– предел прочности: 370 МПа;

– относительное удлинение при разрыве: 30%.

Расчетная масса рамы составила 33 кг, фактическая масса прототипа – 37 кг. Следует отметить, что расчетная масса всегда будет меньше фактической, так как при расчетах сложно учесть массу металла, образующего сварные швы, а также массу деталей болтовых соединений. Также фактическая масса профиля может отличаться от расчетной.

В качестве модели материала была выбрана билинейная модель пластичности с кинематическим упрочнением, а в качестве условия пластичности – критерий Мизеса.

Рама в данном расчете была жестко закреплена в точках крепления переднего колеса и элементов задней подвески. В процессе моделирования задавалась статическая нагрузка в диапазоне от 50 до 250 кг в точках, соответствующих местам крепления сиденья. Такие нагрузки характерны для этой модели солнцеката, так как отражают возможный вес пилота, полезного груза, а также значения динамических нагрузок при поездках на сверхдальние расстояния.

Целью данного расчета является получение значений критической нагрузки, при которой в раме образуются необратимые (пластические) деформации, что, разумеется, недопустимо. Кроме этого, необходимо определить зависимости деформации отдельных

элементов рамы от величины нагрузки, на основании которых затем вычислить жесткость рамы в целом.

### Результаты исследования и их обсуждение

В ходе анализа результатов расчетов были выявлены участки рамы, в которых возникают наиболее значительные деформации изгиба. Это нижний участок рамы в районе крепления сиденья (на рис. 1 эти точки обозначены буквой А), участок в районе закругления дуг, образующих крышу (обозначено буквой Б), и вертикальный участок рамы позади сиденья (обозначено буквой В). Светлыми стрелками показаны направления прогиба рамы. В других точках прогибы менее значительные. Точки, в которых необратимые деформации возникают первыми, обозначены на рисунке темными стрелками. Это места крепления нижней части рамы к узлам подвески задних колес.

На рис. 2 показан график, показывающий зависимость максимального прогиба рамы в точках крепления сиденья от величины нагрузки. Этот график (а также график, изображенный на рис. 3) построен на основе подробного анализа серии прочностных расчетов рамы в пакете ANSYS. Звездочкой показано значение нагрузки, при превышении которой в раме (непосредственно в месте прогиба) возникают пластические деформации. На основе этих результатов можно сделать вывод о том, что максимальная расчетная статическая нагрузка, при которой в раме возникают только обратимые деформации, составляет 172,5 кг. Очевидно, что фактическая эксплуатационная нагрузка будет ниже этой величины и для ее определения нужно проводить расчет рамы в динамической постановке и с учетом всех возможных механических воздействий.

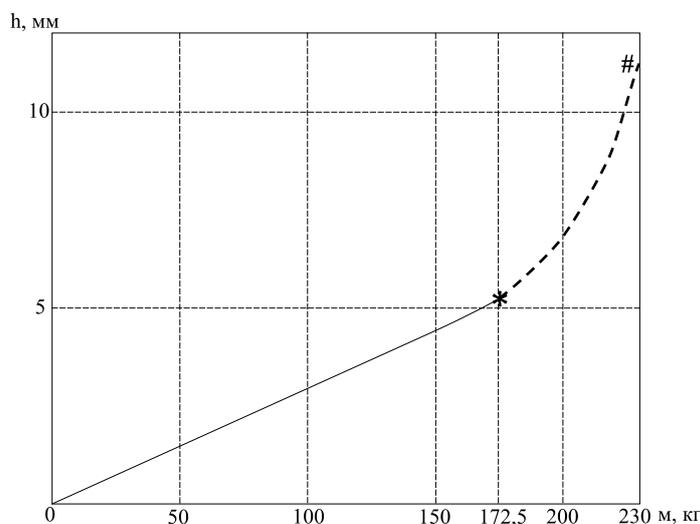


Рис. 2. Зависимость максимального прогиба рамы в точках крепления сиденья от величины нагрузки

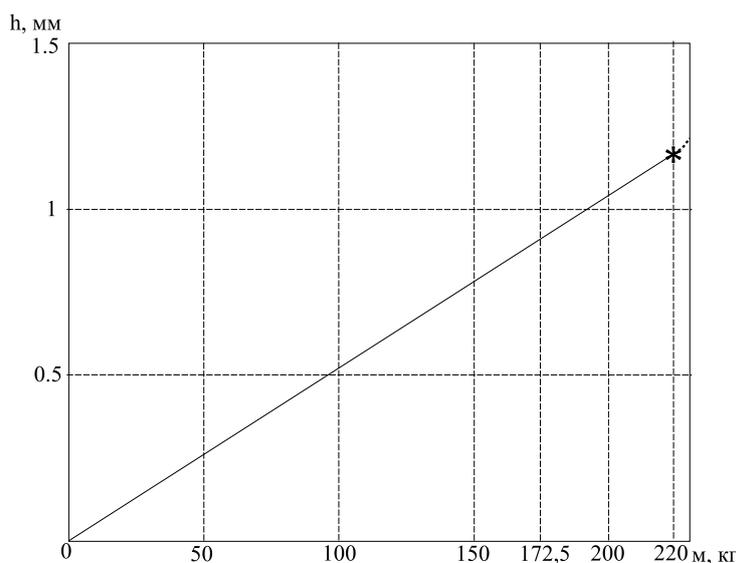


Рис. 3. Зависимость прогиба дуг, образующих крышу, от нагрузки

Значение статической нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости и разрушение (заламывание) рамы, составляет 228 кг (это значение отмечено на графике символом #). Начало процесса разрушения рамы зафиксировано в тех же точках, в которых необратимые деформации возникают первыми.

На рис. 3 изображен график, отражающий зависимость прогиба дуг, образующих крышу солнцеката, от нагрузки. Этот параметр необходимо учитывать, поскольку крыша является несущим элементом для солнечных батарей, которые являются самым дорогим элементом солнцеката. Возможна ситуация, при которой значительный прогиб дуг крыши может привести к разрушению солнечных батарей, даже если деформация металла при этом останется обратимой. Значение нагрузки, при котором в материале дуг крыши возникают пластические деформации, также отмечено символом звездочки.

Из результатов, приведенных на рис. 3, можно сделать вывод, что при достижении статической нагрузки значения 172,5 кг (что соответствует началу необратимых деформаций отдельных элементов рамы) величина прогиба дуг крыши составляет менее 1 мм, что в целом укладывается в допустимые пределы для выбранного типа обтекателя и солнечных батарей и данная нагрузка не приведет к их разрушению. Однако, как уже отмечалось, данный расчет проводился без учета прочности обтекателя, который может создать дополнительную жесткость всей конструкции и уменьшить величину прогиба. Это, возможно, позволит сокра-

тить количество силовых элементов рамы, снизив таким образом ее массу и стоимость. Подобные подходы применяются сегодня, в частности, в автомобилестроении, когда переднее и заднее стекла являются частью силового каркаса кузова, за счет этого такие элементы конструкции, как стойки дверей и крыша, изготавливают из менее жестких стальных листов. В этом случае необходимо учитывать и прочность самого стеклянного полотна. Так, в работе [9] изложена методика прочностного расчета лобового стекла автомобиля ВАЗ-2172 «Приора» с использованием комплекса ANSYS. Аналогичный подход может быть применен и при расчете крыши-обтекателя солнцеката «Турист».

Вместе с тем, возможно наступление такого напряженно-деформированного состояния в верхней части рамы, при котором прогиб дуг крыши достигнет критических значений, что повлечет за собой хрупкое растрескивание обтекателя (например, если он будет изготовлен из полиметилметакрилата, менее прочного материала, чем поликарбонат). Это неизбежно приведет к разрыву полотна солнечных батарей и их гарантированному разрушению. Для определения такого состояния и условий его наступления требуются дополнительные исследования, которые должны быть проведены, в том числе и с учетом необходимых характеристик самих солнечных батарей.

Кроме этого, при выполнении дальнейших работ по проектированию солнцеката следует учитывать, что значительные циклические деформации прогиба отдельных частей рамы могут привести к повреждению или даже раз-

рушению лакокрасочного покрытия на этих участках (даже если необратимые деформации металла, на который это покрытие нанесено, не достигаются), что повлечет за собой ухудшение внешнего вида готового изделия, а в дальнейшем – коррозию. Поэтому выбор лакокрасочного покрытия рамы и технологии его нанесения следует делать с учетом максимальных допустимых деформаций прогиба в раме. Ключевым параметром в этом случае будет механическая стойкость лакокрасочного покрытия (которая эквивалентна предельно допустимой многократно возникающей деформации, не приводящей к разрушению покрытия и не ухудшающей его защитных и косметических свойств в течение заявленного срока эксплуатации готового изделия).

На основе уже полученных результатов можно рекомендовать усилить нижнюю часть рамы в местах крепления сиденья, с целью снижения прогиба рамы. Для того чтобы выполнить эту задачу, требуется установка счет дополнительных элементов, либо изменение существующей конфигурации рамы. В рамках этой задачи авторами дополнительно был проведен численный эксперимент, в котором дополнительно были усилены элементы нижней части рамы, подвергающиеся наибольшим изгибающим нагрузкам (расположение этих элементов на рис. 1 обозначено буквой А). Данный участок рамы был изготовлен из профиля толщиной 4 мм. В результате удалось добиться увеличения предельно допустимой нагрузки на 22% (до 210 кг вместо 172 кг), однако общая картина напряженно-деформированного состояния рамы претерпела изменения, анализ которых будет проведен авторами в следующих работах.

### Заключение

Таким образом, в ходе выполнения данной работы авторами была построена геометрическая модель рамы солнцеката «Турист» и произведен расчет ее прочности в статической постановке. В результате были получены значения нагрузки, вызывающей необратимую деформацию рамы и ее разрушение. На основе этих результатов были сформулированы рекомендации для увеличения прочности рамы в наиболее нагруженных участках и проведены уточняющие расчеты, подтвердившие правильность данных рекомендаций. Однако для выбора оптимального варианта геометрической модели рамы требуются дополнительные исследования.

В рамках продолжения данной работы авторами планируется решить следующие задачи:

- определить зависимость жесткостных и прочностных характеристик рамы от поперечного изгиба (в реальных условиях та-

- кой изгиб возможен при проезде глубоких неровностей дороги задними колесами) и от воздействия на раму внешней поперечной силы (например, при погрузке и транспортировке солнцеката);

- провести все расчеты прочностных и жесткостных характеристик рамы с учетом обтекателя и оценить его влияние на прочность рамы в целом;

- провести расчет всех ранее полученных прочностных и жесткостных характеристик рамы в динамической постановке и с учетом всех возможных эксплуатационных нагрузок;

- произвести анализ типов лакокрасочного покрытия, которые могут применяться для окраски рамы солнцеката, и их предельно допустимых деформаций, затем сопоставить их с максимальными расчетными значениями деформации рамы; в случае, если расчетные деформации рамы окажутся выше допустимых значений для выбранного покрытия, подготовить рекомендации для снижения деформаций, возникающих в раме;

- выполнить все необходимые прочностные расчеты данной конструкции рамы, изготовленной из других материалов (алюминия, карбона и т.д.);

- на основе проведенных расчетов подготовить рекомендации для проектирования оптимальной конструкции рамы солнцеката в целом с точки зрения прочности, жесткости, массы и стоимости.

### Список литературы

1. Патент на полезную модель № 82640 Российская Федерация. Гелиовелосипед // Галушак В.С., Сошинов А.Г., Карпенко О.И. и др. Опубл. 10.05.09. Бюл. № 13. 3 с.
2. Солнцекат [Электронный ресурс]. URL: <http://solncekat.ru/> (дата обращения: 20.11.2018).
3. Поливанов А.А., Галушак В.С. Основы концептуальных положений при проектировании солнцеката «Турист» // Успехи современной науки. 2017. Т. 4. № 4. С. 61–63.
4. Калимулин М.Р. Анализ процесса формирования технического облика особо лёгких высокоподвижных колёсных транспортных средств для горных условий эксплуатации // Электронный научно-технический журнал «Наука и образование». 2012. № 11. [Электронный ресурс]. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/465856.html>. DOI: 10.7463/1112.0465856 (дата обращения: 20.11.2018).
5. Ковеня А.С., Пронкевич С.А., Чернышев Д.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния каркаса городского автобуса в среде ANSYS // Автомобильная промышленность. 2011. № 3. С. 16–19.
6. Маркова Е.В., Чечуга О.В. Использование программы ANSYS для анализа работоспособности конструкций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8–2. С. 206–209.
7. Косенко Е.Е. и др. Моделирование напряженного состояния элемента рамной конструкции автомобиля в КЭ комплексе ANSYS // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. 2014. № 4. С. 79–84.
8. Молчанов А.И., Молчанова Е.А. Решение инженерно-технических задач средствами ANSYS // Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. 2012. № 1. С. 114–120.
9. Переверзев А.С., Семенихин Б.А., Кузнецова Л.П. Использование программного комплекса ANSYS для исследования прочностных характеристик ветрового стекла автомобиля // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 2(19). С. 108–114.