

# ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ СТАНДАРТНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ КРУТИЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАМ АВТОМОБИЛЕЙ БАГГИ

д.т.н. Баженов Е.Е.<sup>1</sup>, к.т.н. Буйначев С.К.<sup>2</sup>, Кустовский А.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный лесотехнический университет(УГЛТУ)

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ)

Kustovsky88@mail.ru

*В статье дается оценка границ применимости стандартной методики оценки крутильной жесткости пространственных стержневых несущих систем автомобилей. Жесткость на кручение, как показывают многочисленные исследования и практика, является одним из наиболее важных показателей несущей способности кузовов (рам) автомобилей всех типов – в том числе и таких узкоспециализированных, как багги. Авторами показывается на примере несущей конструкции автомобиля повышенной проходимости класса «багги», что общеприменительный подход к оценке крутильной жесткости несущих систем при помощи угла закручивания натывается на ограничения, когда речь заходит о пространственных рамах сложной конструкции. Эти ограничения продиктованы различием в жесткости между зонами конструкции (под зонами следует понимать область пола, поясную область и область крыши), что находит отражение в существенно различающемся распределении перемещений в них. В результате этого становится невозможным однозначно дать заключение о крутильной жесткости рамы при помощи угла закручивания, поскольку невозможно выбрать референсную точку в какой-либо из зон (или зону целиком) для адекватного описания крутильной жесткости всей конструкции (или отдельной подконструкции). В связи с этим авторами предложены границы применимости традиционного способа оценки жесткости на кручение пространственной стержневой конструкции, а также предложен способ преодоления указанных затруднений, возникающих при попытках дать оценку крутильной жесткости несущей структуры. В качестве объекта исследования выступает типовая пространственная рама автомобиля повышенной проходимости багги класса D2.*

**Ключевые слова:** багги, несущая структура, подконструкции, кручение, крутильная жесткость.

## Введение

Крутильная жесткость кузовов транспортных средств является одним из основных показателей их несущей способности [1, 2, 3]. В условиях движения, в особенности по дорогам со сложным покрытием, возникающие нагрузки могут приводить к закручиванию кузова различной величины вокруг продольной оси. Сценарии возникновения такого рода деформаций довольно разнообразны. При этом кручение вызывает наиболее сложное напряженно-деформированное состояние конструкции [3]. В этой связи необходимо обеспечить при проектировании конструкции (или доработке уже существующей) прочность и жесткость, достаточную для сопротивления закручивающей нагрузке. Для оценки мер, направленных на повышение сопротивляемости закручиванию, следует задаться неким критерием, позволяющим проводить прямое сравнение

различных вариантов усиления конструкции и предполагающим однозначную трактовку. Традиционно таким критерием выступает угол закручивания. Данный параметр позволяет однозначно оценивать крутильную жесткость несущей структуры лишь в случае рам (лестничного типа, хребтовая и т.д.), конструкция которых не предполагает пространственного расположения элементов. В случае таких конструкций не представляет труда выбрать референсную точку, перемещение при нагружении закручивающей нагрузкой которой и будет однозначно характеризовать крутильную жесткость всей рамы. Иначе дело обстоит с пространственными несущими структурами, набранными из различно ориентированных в пространстве стержневых элементов. В этом случае попытки выбрать референсную точку натываются на трудности, о которых подробнее будет сказано ниже.

Целью данной статьи является обозначение границ применимости оценки крутильной жесткости при помощи угла закручивания применительно к пространственным стержневым несущим структурам, а также предложение мер для преодоления затруднений на пути определения жесткости на кручения таких систем.

**Особенности деформированного состояния пространственных стержневых рам при кручении и затруднения в однозначной оценке их крутильной жесткости**

Деформацию кручения условно проиллюстрирована на рис. 1.

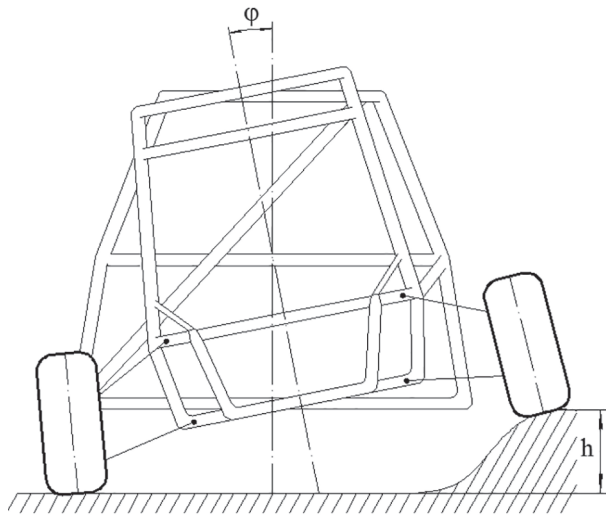


Рис. 1. Схема закручивания несущей структуры автомобиля вокруг продольной оси

Мерой закручивания рамы служит относительный угол закручивания φ [1, 3] (рис. 2):

$$\varphi = \arctg\left(\frac{2 \cdot \Delta}{B}\right), \quad (1)$$

где Δ – вертикальное перемещение произвольной точки на раме, B/2 – расстояние от измеряемой точки до плоскости продольной симметрии автомобиля.

Угол закручивания определяется вдоль любого из элементов рамы в пределах расстояния Φ, обозначающего удаленность точек крепления передней подвески от точек крепления задней [4] (рис. 3).

Особенность пространственных рамных конструкций состоит в том, что в различных ее зонах (условно: пол, поясная линия и крыша) деформации могут отличаться как по амплиту-

де, так и по закону распределения. Проиллюстрируем сказанное (рис. 4).

Для случая, показанного на рис. 4, оценка жесткости отдельной подконструкции (равно как и всей рамы) с использованием зависимости (1) наталкивается на затруднения, поскольку встает вопрос выбора элемента, деформированное состояние которого могло бы характеризовать жесткость рассматриваемой конструкции. Выходом могло бы быть получение всего

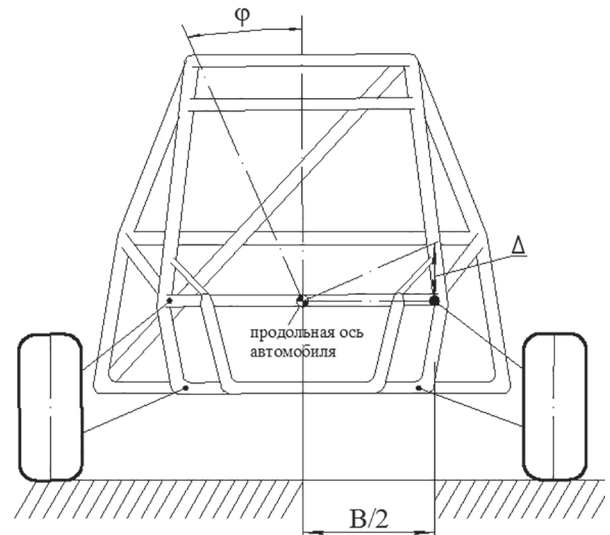


Рис. 2. Схема для определения относительного угла закручивания

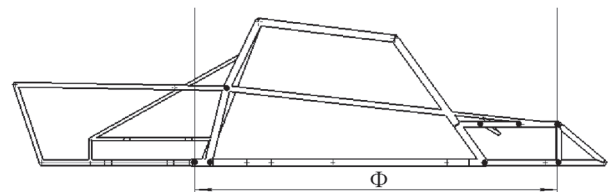


Рис. 3. К определению расстояния Φ: черным обозначены точки крепления подвески

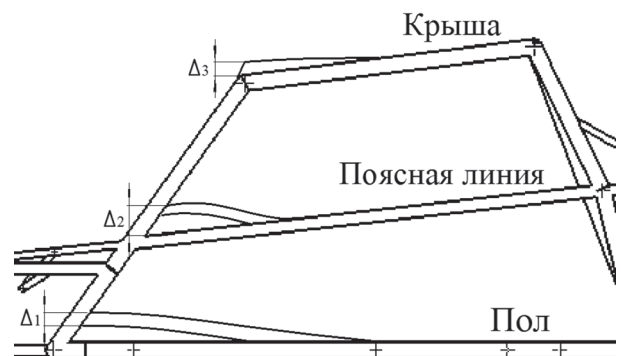


Рис. 4. Возможная картина деформация различных элементов одной подконструкции

возможного многообразия углов закручивания для составляющих конструкцию элементов, но анализ такой информации представляется весьма сложным. Более того, в случае существенных различий в картине деформации элементов становится невозможным дать однозначное заключение о жесткости рассматриваемой конструкции, поскольку жесткости различных ее зон будут отличаться между собой.

### **Меры к преодолению затруднений при оценке крутильной жесткости пространственных рам**

Чтобы иметь возможность давать однозначную оценку жесткости несущей конструкции автомобиля багги необходимо, чтобы воспринимающие наибольшую нагрузку элементы имели схожую картину деформации, т.е. характер перемещений вдоль этих элементов, равно как и значения перемещений, были сопоставимы. В этом случае углы закручивания вдоль конструкции (или подконструкции) для любых ее характерных элементов также будут иметь сравнимые значения, а их графики будут иметь

в деформированное состояние продольных стержней в наибольшей степени характеризует жесткость отдельной подконструкции и конструкции целиком.

Поскольку продольные стержни формируют все зоны рамы – от пола до крыши – для удобства дальнейшего изложения было введено понятие слоя, которое обозначает расположение того или иного продольного стержня в подконструкции или конструкции целиком. На рис. 5 представлена схема, иллюстрирующая понятие слоев.

Как видно из рисунка, разбиение на слои может осуществляться как для всей рамы целиком, так и для отдельных подконструкций. Объединение в слои происходит для продольных стержней, имеющих общий узел. Также важно заметить, что данное разбиение оправдано лишь для симметричных или кососимметричных относительно продольной оси автомобиля режимов нагружения, когда деформированное состояние продольных элементов левого и правого борта будет иметь симметричный, либо кососимметричный характер.

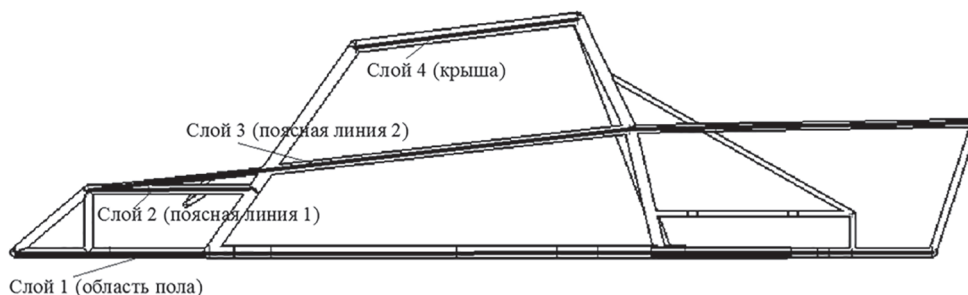


Рис. 5. Разбиение продольных стержней конструкции на слои

схожий характер. Это условие делает возможным оценку крутильной жесткости всей подконструкции (или конструкции целиком), используя для рассмотрения один из характерных ее элементов. Характерными элементами будем называть те элементы конструкции, которые в наибольшей степени характеризуют ее деформированное состояние.

Авторами работы в ходе исследований было выявлено, что в качестве характерных элементов несущей системы автомобилей багги выступают продольные элементы отдельных подконструкций: в режиме кручения именно в них наблюдаются самые большие деформации, в то время как поперечные и вертикальные элементы перемещаются как единое целое, практически не испытывая деформаций. По этой при-

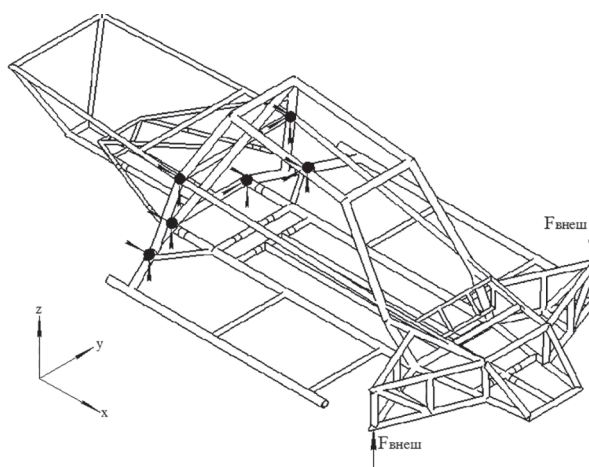


Рис. 6. Схема закрепления и нагружения рамы при кручении

Для режимов нагружения, где невозможно соблюдение этого условия, введение слоев теряет свой смысл, поскольку картина деформаций стержней левого и правого борта будут (вероятно) существенно отличаться друг от друга и само разбиение на слои станет невозможным.

Ниже представлены условия нагружения и закрепления для режима кручения:

Нагрузка выбирается таким образом, чтобы обеспечить работу материала в пределах зоны упругости. На рис. 7 представлены результаты расчетов рамы для режима кручения.

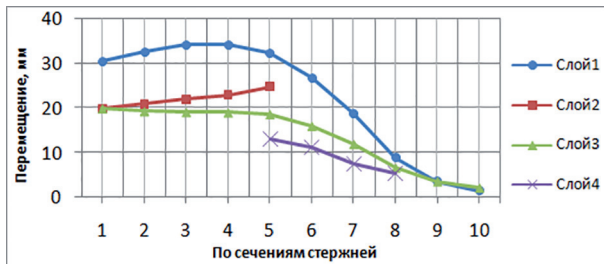


Рис. 7. Диаграмма перемещений в слоях конструкции

Результаты получены при помощи компьютерного моделирования на основе метода конечных элементов. Из диаграммы можно увидеть, насколько сильно отличаются перемещения в слоях, что делает невозможным оценку крутильной жесткости конструкции при помощи относительного угла закручивания (1). Для такой оценки потребовалось бы выбрать один из слоев в качестве референсного, что в данном случае привело бы к неадекватному описанию жесткости на кручение в силу очевидных различий в характере и амплитуде деформаций слоев. Сечения с первого по четвертый включительно относятся к переднему подрамнику, остальные – к кокпиту. Используя данную диаграмму, можно анализировать разницу в перемещениях различных слоев всей конструкции. Аналогичные диаграммы можно построить и для подконструкций.

Рассмотрим самую крупную и металлоемкую подконструкцию данной рамы, а именно кокпит (рис. 8). Разделим его на слои, как это было сделано на рис. 5.

Для того чтобы иметь возможность дать однозначное заключение о крутильной жесткости, необходимо, чтобы значения и характер перемещений в слоях были сопоставимы. Разумеется, сложно требовать от конструкции полного совпадения перемещений в различных

зонах, однако чем меньше разница в них, тем точнее можно охарактеризовать жесткость на кручение, используя любой из элементов произвольного слоя. Добиться этого на стадии проектирования можно внесением в конструкцию усиливающих элементов.

Рассмотрим, как различные варианты усиления кокпита влияют на перемещения в слоях и, как следствие, на угол закручивания. На рис. 9 представлены схемы усиления конструкции кокпита, изображенного на рис. 8.

На диаграммах (рис. 10, 11) показаны перемещения в слоях представленных конструкций, а также углы закручивания в них относительно продольной оси [5].

Как видно из представленных диаграмм на рис. 10, последовательное усиление кокпита привело к тому, что разница значений относительного угла закручивания стала меньше, достигнув минимума в варианте в. Для более полной картины на рисунке 11 представлены также перемещения в слоях. Исходя из этого можно сделать вывод, что конструкция в обладает наибольшей крутильной жесткостью из представленных. Следовательно, в данном случае есть основания делать однозначный вывод касательно ее жесткости на кручение

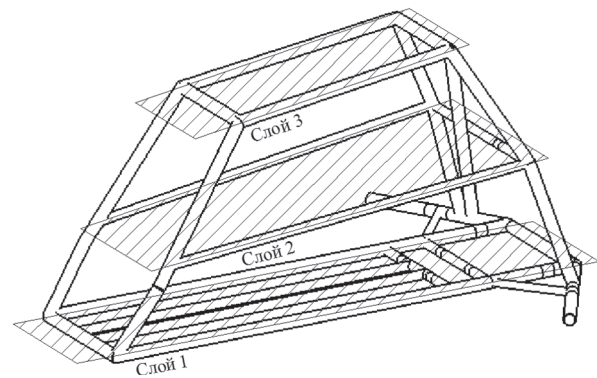


Рис. 8. Разделение зон кокпита на слои

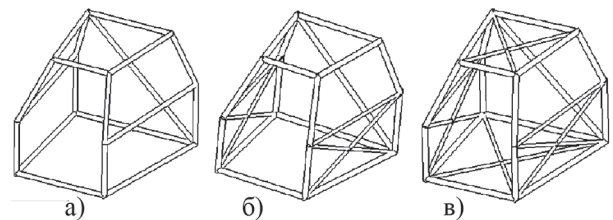


Рис. 9. Силовые схемы кокпита:  
а) стандартная конструкция; б) усиление X-образными боковыми распорками; в) усиление крыши, пола и боковин X-образными распорками

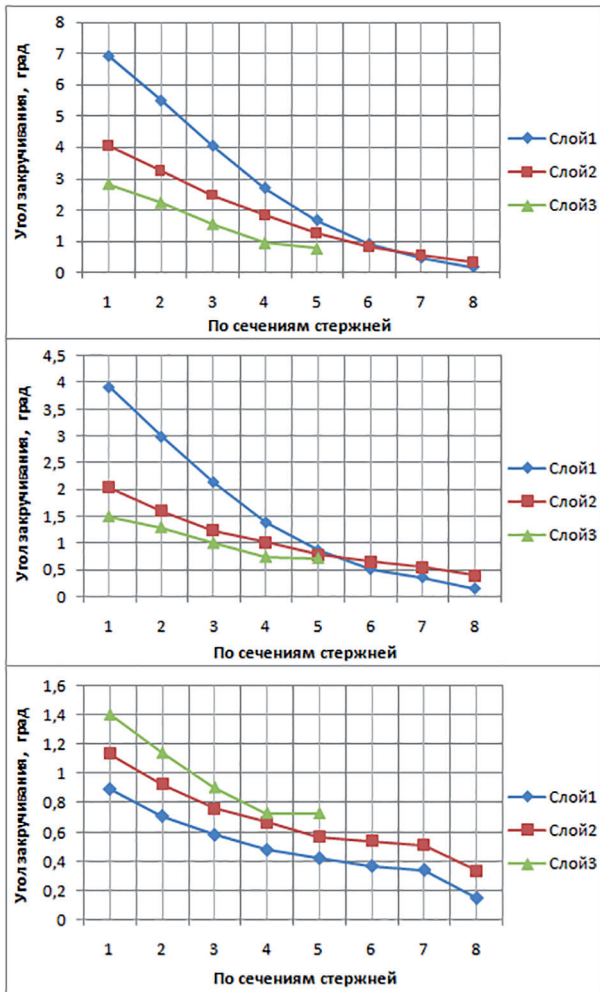


Рис. 10. Углы закручивания в слоях. Сверху вниз: вариант а, б и в

при помощи выражения (1), используя при этом в качестве референсного любой из слоев конструкции.

### Выводы

Разумеется, данный подход нельзя рассматривать в качестве строгого инструмента оценки крутильной жесткости несущих систем автомобилей багги. Однако в данной работе преследовалась цель показать невозможность дать однозначное заключение о крутильной жесткости рамы (или ее подконструкций), если в различных ее зонах (слоях) картина перемещений существенно отличается. На примере различных вариантов усиления кокпита был показан способ преодоления данного затруднения. Было показано, что минимальная разница в перемещениях и угле закручивания в слоях позволяет при помощи формулы (1) оценивать жесткость всей подконструкции, а не только отдельных ее зон.

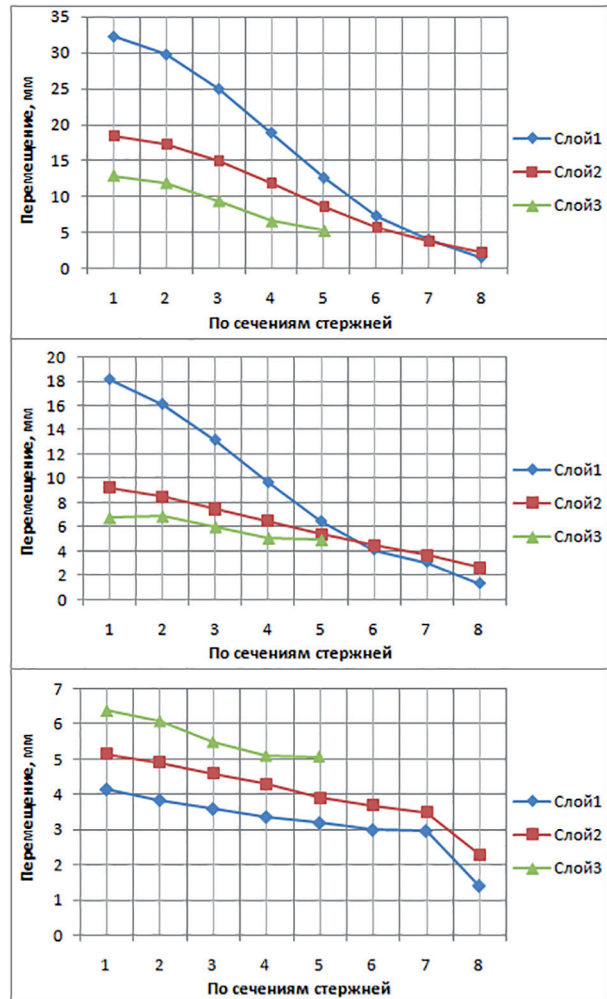


Рис. 11. Перемещения в слоях. Сверху вниз: вариант а, б и в

### Литература

1. Воронцова Н.И., Круглов А.А., Сарычев Ю.А. Расчет кузова большого городского автобуса на изгиб и кручение. М.: Труды НАМИ, 1986.
2. Павловский Я. Автомобильные кузова. М.: Машиностроение, 1977. 544 с.
3. Teby S., Esmailzadeh E., Barari A. Methods to Determine Torsion Stiffness in an Automotive Chassis // Computer – Aided Design & Applications. PACE (1), 2011, 67–75.
4. Кудрявцев С.М. Теоретические и экспериментальные исследования кузова современного автомобиля. Нижний Новгород, 2009. 220 с.
5. Stiffness relevance and strength relevance in crash of car body components // European Aluminium Association, 2010, 1–58.

### References

1. Voroncova N.I., Kruglov A.A., Sarychev YU.A. Calculation of the body of a large city bus for bending and torsion. Moscow: *Trudy NAMU*, 1986 (in Russ.).

2. Pavlovskij YA. *Avtomobil'nye kuzova* [Vehicle body]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 544 p.
3. Tebby S., Esmailzadeh E., Barari A. Methods to Determine Torsion Stiffness in an Automotive Chassis // *Computer – Aided Design & Applications*. PACE (1), 2011, 67–75.
4. Kudryavcev S.M. *Teoreticheskie i ehksperimental'nye issledovaniya kuzova sovremennogo avtomobilya* [Theoretical and experimental studies of the body of a modern vehicle]. Nizhnij Novgorod, 2009. 220 p.
5. Stiffness relevance and strength relevance in crash of car body components // *European Aluminium Association*, 2010, 1–58.

## LIMITS OF APPLICABILITY OF THE STANDARD METHOD FOR ESTIMATING THE TORSIONAL RIGIDITY OF SPATIAL FRAMES OF BUGGY VEHICLE

DSc in Engineering **E.E. Bazhenov**<sup>1</sup>, Ph.D. **S.K. Bujnachev**<sup>2</sup>, **A.N. Kustovskij**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural State Forest Engineering University

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia Boris N. Yeltsin  
Kustovsky88@mail.ru

*The article provides an assessment of the limits of applicability of the standard methodology for estimating the torsional rigidity of spatial rod-bearing systems of automobiles. Torsional stiffness, as shown by numerous studies and practices, is one of the most important indicators of the carrying capacity of vehicle bodies (frames) of all types of vehicles – including such highly specialized ones as buggy. The authors show on the example of the bearing structure of an off-road vehicle of the “buggy” class that the general application approach to the assessment of the torsional rigidity of the bearing systems using torsion deflection stumbles upon limitations when it comes to spatial frames of complex construction. These restrictions are dictated by the difference in stiffness between design zones (zones should be understood as the floor area, the waist area and the roof area), which is reflected in the significantly different distribution of displacements in them. As a result, it becomes impossible to unequivocally give an opinion on the torsional rigidity of the frame using torsion deflection, since it is impossible to select a reference point in any of the zones (or the entire zone) to adequately describe the torsional rigidity of the whole structure (or a separate substructure). In this regard, the authors proposed the limits of applicability of the traditional method for estimating the torsional stiffness of a spatial core structure, and also proposed a method for overcoming these difficulties encountered when trying to assess the torsional stiffness of the supporting structure. The object of the research is a typical spatial frame of an all-terrain automobile of the D2 class buggy.*

**Keywords:** *buggy, supporting structure, substructure, torsion, torsional stiffness.*