

УДК 623.113

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_4\_85

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ЧИСЛЕННОГО ПОВЕДЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

**Д.А. Жителев**

ORCID: 0000-0002-8080-1419 e-mail: zhitelevda@student.bmstu.ru  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия

**Т.Д. Поздняков**

ORCID: 0000-0001-8966-1806 e-mail: t.pozdnyakov@bmstu.ru  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия

**Д.А. Сулегин**

ORCID: 0000-0003-3359-3829 e-mail: d\_sulegin@bmstu.ru  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия

**В.Н. Наумов**

ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: vn.naumov1941@yandex.ru  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия

Анализируется проблема обеспечения пассивной безопасности пилотов гоночных автомобилей за счет применения каркаса безопасности. Разработана конечно-элементная модель (КЭМ) каркаса безопасности. Поведение материала труб каркаса описано пластичным типом, с изотропным упрочнением, который позволяет учесть нелинейность свойств. Смоделированы испытания, регламентированные Российской Автомобильной Федерацией (РАФ). При горизонтальном нагружении главной дуги деформации в два раза превышают установленный допуск. Для выполнения требований РАФ и обеспечения пассивной безопасности пилотов необходимо дополнительное исследование с применением топологической оптимизации. С целью верификации КЭМ моделируется испытание на трехточечный изгиб трубы, а также проведен натурный эксперимент. Для исследования выбраны два образца из среднеуглеродистой стали, и два образца из легированной высококачественной стали. Трубы из легированной стали выдерживают нагрузку на 23 % большую, чем трубы из среднеуглеродистой стали. Расхождение результатов моделирования и эксперимента не превышает 9 %, что подтверждает достоверность передачи КЭМ поведения реальной конструкции.

**Ключевые слова:** каркас безопасности, пассивная безопасность, конечно-элементная модель, деформация, сталь, боковой удар, трехточечный изгиб, верификация.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Жителев, Д.А. Исследование экспериментального и численного поведения тонкостенных труб при квазистатическом режиме нагружения / Д.А. Жителев, Т.Д. Поздняков, Д.А. Сулегин, В.Н. Наумов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 85-96. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_4\_85

## THE RESEARCH OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL PERFORMANCE OF THIN-WALLED TUBES AT QUASI-STATIC LOAD CONDITIONS

**D.A. Zhitelev**

ORCID: 0000-0002-8080-1419 e-mail: zhitelevda@student.bmstu.ru  
Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia

**T.D. Pozdnyakov**

ORCID: **0000-0001-8966-1806** e-mail: **t.pozdnyakov@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**D.A. Sulegin**

ORCID: **0000-0003-3359-3829** e-mail: **d\_sulegin@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**V.N. Naumov**

ORCID: **0000-0001-5172-0364** e-mail: **vn.naumov1941@yandex.ru**

Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** The authors analyze the problem of passive safety assurance for racing car drivers using safety cages. Finite-element model (FEM) of a safety cage is developed. Cage tubing material performance is described as elastic-type, equipped with isotropic strain hardening allowing to account for non-linear properties. The simulation tests regulated by the Russian Automobile Federation (RAF) are carried out. At horizontal load on the main arch, the strains exceed the established tolerance twice. To meet RAF requirements and ensure passive safety for drivers, additional, topologically optimized, testing is needed. FEM is verified through a three-point bending simulation test and a full-scale experiment. The investigators have chosen two samples made of medium carbon steel and two samples made of compound high-grade steel for the study. Tubes of compound steel can resist 23 % higher load than tubes of medium carbon steel. The discrepancy between simulation results and experimental results does not exceed 9%, assuring that the FEM shows the performance of an actual structure.

**Key words:** safety cage, passive safety, finite-element model, strain, steel, side impact, three-point bending, verification.

**FOR CITATION:** D.A. Zhitelev, T.D. Pozdnyakov, D.A. Sulegin, V.N. Naumov. The research of experimental and numerical performance of thin-walled tubes at quasi-static load conditions. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. С. 85-96. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_4\_85

## Введение

В целях обеспечения пассивной безопасности пилотов гоночных автомобилей обязательным требованием для допуска к соревнованиям является установка каркаса безопасности. Конструкция каркаса безопасности должна быть легкой, а также должна соответствовать требованиям РАФ касательно структуры и прочности [1]. Основные силовые элементы каркасов состоят из тонкостенных труб, соединенных между собой, как правило, сварными швами. Каркас безопасности, как и другие силовые элементы конструкции автомобиля, при ударе испытывает изгиб, потерю устойчивости и смятие. Для силовых конструкций исследования прочности проводятся как экспериментально, так и посредством метода конечных элементов (МКЭ). Существует ряд работ, описывающий особенности создания КЭМ при исследовании пассивной безопасности [2-8]. При ударном взаимодействии снижается способность каркасных элементов воспринимать нагрузку так же, как и при трехточечном изгибе [9]. На несущую способность труб влияет как материал, из которого они изготовлены, так и форма поперечного сечения. При изготовлении конструкций, обеспечивающих пассивную безопасность, следует использовать трубы круглого сечения [10]. Трубы квадратного сечения выдерживают меньшую по величине нагрузку и разрушаются в местах концентрации напряжений. В работе Mohanty проводился обзор работ на тему сравнения характеристик различных материалов для разработки каркасов безопасности [11]. Наиболее прочной сталью, используемой при изготовлении каркасов, является AISI 4130, наиболее доступной – AISI 1018. Российским аналогом стали AISI 1018 является сталь 15, которая может быть заменена на сталь 20. Аналогом стали

AISI 4130 является сталь 30ХМ, а также сталь 30ХГСА [12]. Особое внимание в данной работе уделяется численному моделированию поведения труб при квазистатическом режиме нагружения при помощи МКЭ. Проведено сравнение поведения труб из более прочной стали, но и более дорогой, а также из менее прочной стали. Для верификации теоретических положений приведены результаты стендового эксперимента.

### Анализ напряженно-деформированных состояний (НДС) каркаса безопасности

В качестве объекта исследования выбран автомобиль ВАЗ-2104, как наиболее популярный в дисциплине «Дрифт» в зимних чемпионатах. По внутренним параметрам данного автомобиля создана стержневая модель (рис. 1).

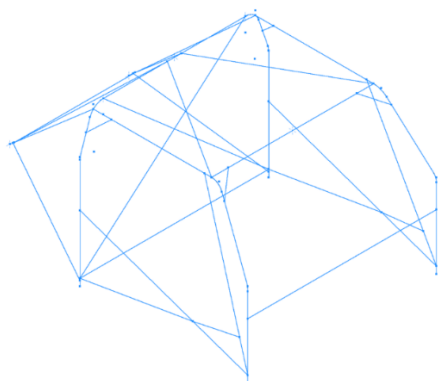


Рис. 1. Стержневая модель

Fig. 1. Rod model

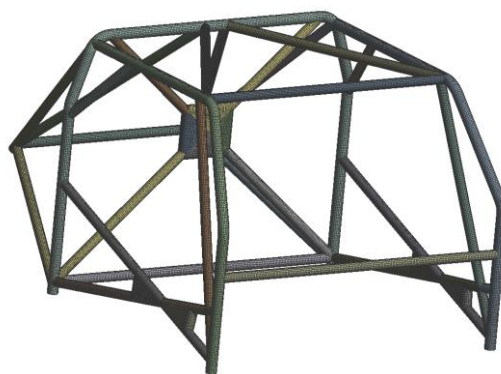


Рис. 2. КЭМ каркаса безопасности

Fig. 2. FEM of the safety cage

Согласно статье 253 приложения J, конструкция основана на главной дуге и двух боковых полудугах, а также дополнена обязательными V-образными элементами в плоскости крыши и X-образными – в боковых поверхностях, повторяющих профиль дверей автомобиля [1]. Основные элементы выполнены из труб диаметром 45x2,5 мм, дополнительные – из труб диаметром 40x2 мм. При создании КЭМ (рис. 2) выбран размер конечного элемента (КЭ) равный 7 мм, что характерно для среднеуровневых моделей [13]. Количество элементов – 96413. Сетка КЭ смоделирована преимущественно четырехузловыми оболочечными элементами типа Бельчко-Лина-Цая. Сварные швы моделировались при помощи сшивания сетки и связи узлов соседних элементов (рис. 3).

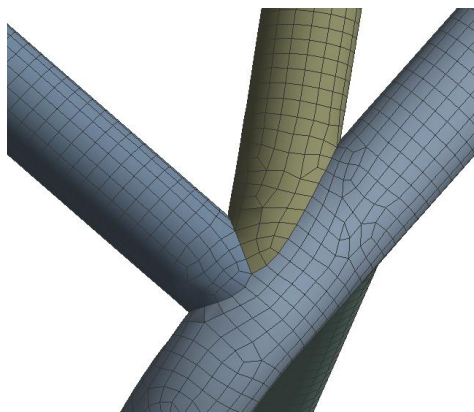


Рис. 3. КЭМ каркаса безопасности (моделирование сварных швов)

Fig. 3. FEM of the safety cage (modeling of welds)

В качестве материала труб выбрана сталь 20. Данный вид стали относится к классу среднеуглеродистых. При больших ударных нагрузках такой материал работает в зоне накопления пластических деформаций (возникающие напряжения превосходят по величине предел текучести), следовательно, для получения корректных результатов моделирования следует учитывать физическую нелинейность свойств. В этом случае использовался материал типа 3 – пластичный, с изотропным упрочнением [14]. Характеристики данного материала задаются при помощи двухлинейной аппроксимации (рис. 4).

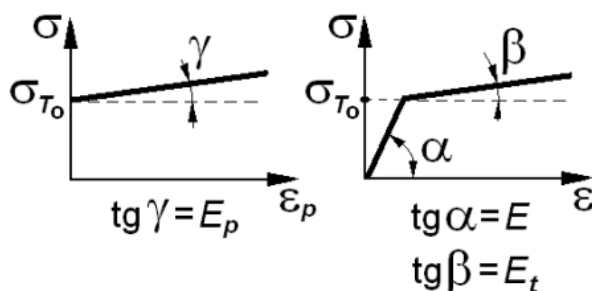


Рис. 4. Линейная аппроксимация характеристики упруго-пластического материала

Fig. 4. Linear approximation of elastoplastic material characteristic

Такой способ представления характеристик описывается следующими формулами:

$$E_p = \frac{\partial \sigma_T}{\partial \varepsilon_p} = \frac{\partial \sigma_T}{\partial \left( \varepsilon_p - \frac{\sigma_T}{E} \right)}; \quad (1)$$

$$\sigma_T = E_p \varepsilon_p + \sigma_{T0}; \quad (2)$$

$$E_p = \frac{E \cdot E_t}{E - E_t}. \quad (3)$$

Характеристики для стали 20 представлены в табл. 1.

Таблица 1.

#### Характеристики материала

Table 1.

#### Material characteristics

	Сталь 20
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7859
Коэффициент Пуассона	0,3
Модуль Юнга, ГПа	213
Предел текучести, МПа	245
Предел прочности, МПа	412
Относительное удлинение, %	21

Также задана кусочно-линейная диаграмма зависимости между напряжением и деформацией для стали 20 ( $E_t = 1044$  МПа) (рис. 1). Испытания каркаса безопасности регламентируются РАФ [1]. При испытании на главной дуге каркаса безопасности в сборе должен выдерживать вертикальную нагрузку, приложенную к вершине главной дуги через жесткий штамп, вычисляемую по формуле (4):

$$P_1 = 7,5 \cdot g \cdot (m + 150), \quad (4)$$

где  $g = 9,81 \frac{m}{c^2}$  – ускорение свободного падения;  $m = 1020$  кг – сухой вес автомобиля ВАЗ 2104.

Следовательно,

$$P_1 = 7,5 \cdot 9,81 \cdot (1020 + 150) = 86053 \text{ Н.}$$

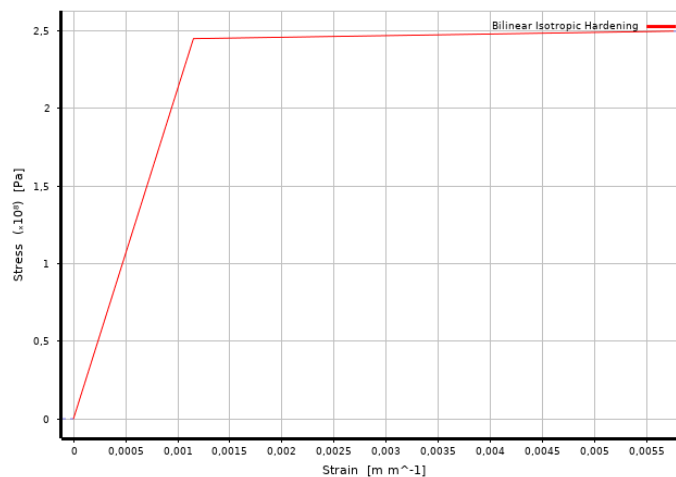


Рис. 5. Кусочно-линейная характеристика стали 20

Fig. 5. Piecewise linear characteristic of steel 20

При испытании во всей структуре не должно возникнуть деформаций, превышающих 50 мм в направлении приложения нагрузки. Схема установки для проведения испытания приведена на рис. 6.

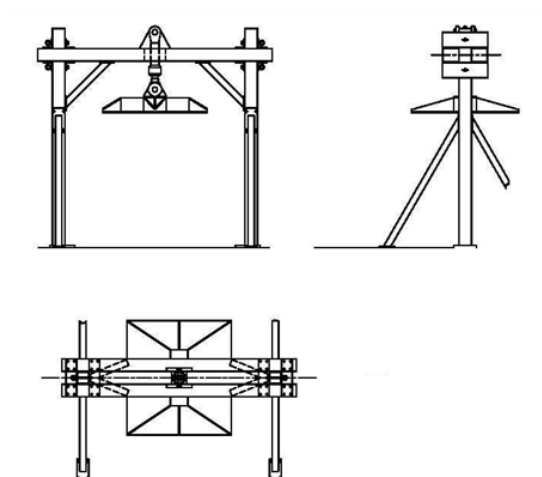


Рис. 6. Схема установки для проведения испытания на главной дуге

Fig. 6. Layout of the unit for main arch testing

При проведении испытания на передней дуге каркас должен выдерживать нагрузку, вычисляемую по формуле (5):

$$P_2 = 3,5 \cdot g \cdot (m + 150), \tag{5}$$

$$P_2 = 3,5 \cdot 9,81 \cdot (1020 + 150) = 40158 \text{ Н.}$$

Нагрузка прикладывается при помощи плиты (рис. 7).

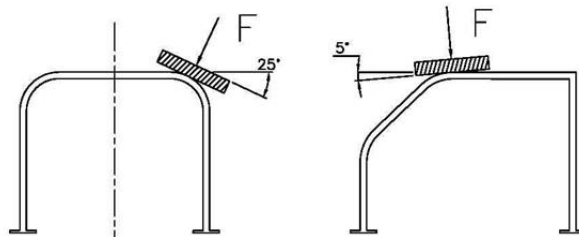
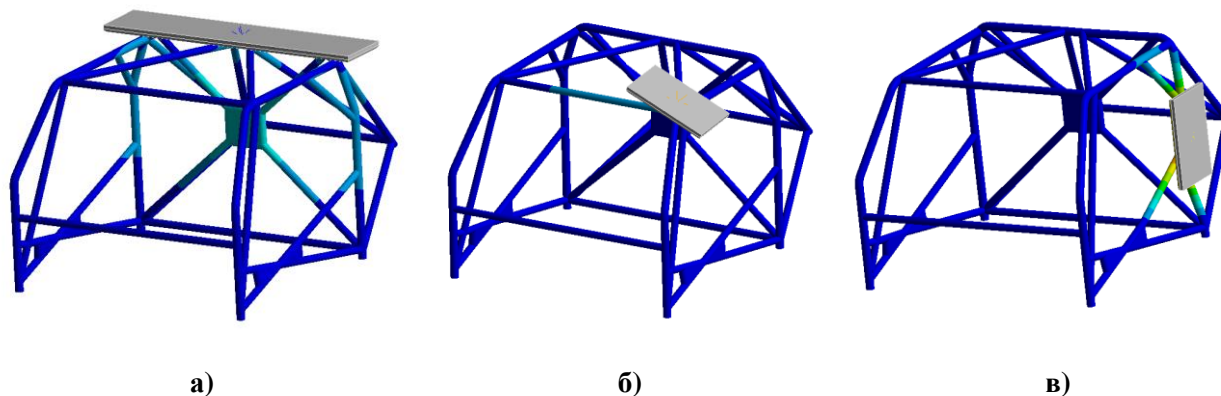


Рис. 7. Схема нагрузки при испытании на передней дуге

Fig. 7. Load pattern for front arch testing

При испытании во всей структуре не должно возникнуть деформаций, превышающих 100 мм в направлении приложения нагрузки. При горизонтальном испытании главной дуги величина нагрузки также рассчитывается по формуле (2). Нагрузка прикладывается горизонтально к вертикальной части главной дуги. При испытании во всей структуре не должно возникнуть деформаций, превышающих 50 мм в направлении приложения нагрузки. В результате моделирования испытаний получена картина деформированного состояния, представленная на рис. 8, 9.

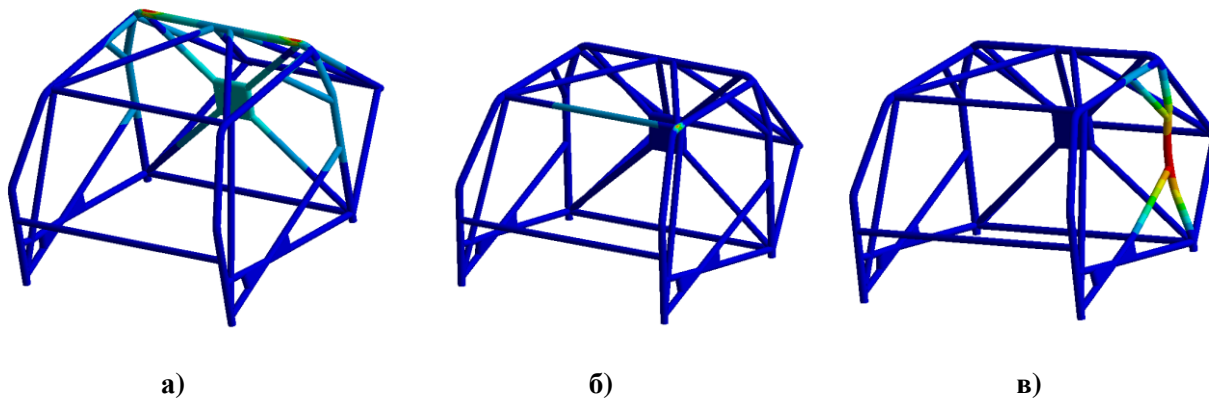


**Рис. 8. Перемещения в конструкции под нагрузкой (с нагружающей плитой):**

*а – испытание на главной дуге; б – испытание на передней дуге; в – боковое испытание главной дуги*

**Fig. 8. Displacements in loaded structure (with a loading plate):**

*a) main arch testing; b) front arch testing; c) side impact main arch testing*



**Рис. 9. Перемещения в конструкции под нагрузкой (без нагружающей плиты):**

*а – испытание на главной дуге; б – испытание на передней дуге; в – боковое испытание главной дуги*

**Fig. 9. Displacements in loaded structure (without a loading plate):**

*a) main arch testing; b) front arch testing; c) side impact main arch testing*

При испытании на главной дуге наибольшие деформации наблюдаются по краям горизонтальной части главной дуги. Труба преимущественно деформируется в своем сечении. Нагрузку также воспринимает X-образная распорка главной дуги. При испытании на передней дуге деформируется боковая полудуга в своем сечении в зоне приложения нагрузки. Нагрузка передается на переднюю верхнюю распорку. При горизонтальном испытании главной дуги большие перемещения наблюдаются по всей вертикальной части главной дуги. Наибольшие перемещения в зоне приложения нагрузки. Под действием силы за вертикальной частью главной дуги «утягиваются» боковая X-образная распорка и верхняя укосина. Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2.

## Результаты моделирования испытаний каркаса безопасности

Table 2.

## Results of the safety sage simulation testing

	Максимальные напряжения, МПа	Максимальные деформации, мм	Допускаемые деформации, мм
Испытание на передней дуге	311,8	4,34	100
Испытание на главной дуге	276,4	1,06	50
Горизонтальное нагружение главной дуги	452,9	102,2	50

При первых двух испытаниях каркас деформировался незначительно. При горизонтальном испытании главной дуги деформация превысила более чем в два раза установленный допуск. Таким образом, конструкция каркаса требует дополнительного исследования. Для устранения существующих недостатков должна быть проведена топологическая оптимизация конструкции, на что будет направлено дальнейшее исследование.

## Исследование численного поведения тонкостенных труб

Испытания металлических изделий на изгиб регламентируется ГОСТ 14019-2003. На рис. 10 представлена схема испытания.

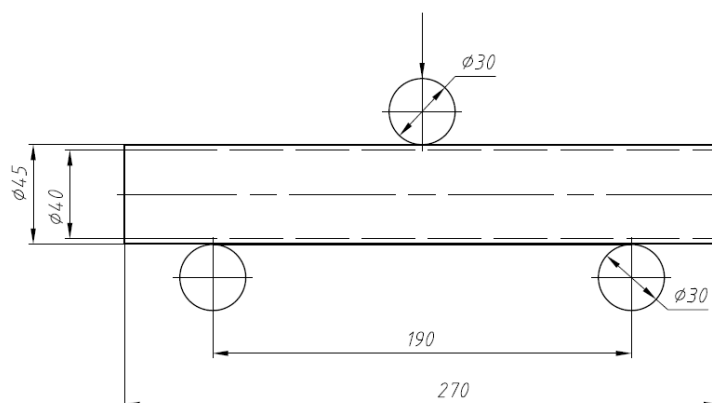


Рис. 10. Схема испытания на трехточечный изгиб

Fig. 10. Pattern of the three-point bending test

Моделирование трехточечного изгиба проводится в два шага: на первом шаге оправка перемещается на 30 мм перпендикулярно оси трубы; на втором, возвращается в исходное положение. При создании КЭМ принималось допущение о симметричности модели. Выбран размер КЭ, равный 2,5 мм, что характеризует высокую точность модели [13]. Сетка моделировалась при помощи четырехузловых оболочечных элементов типа Белычко-Лина-Цая. Сетка состоит из 1908 элементов. КЭМ представлена на рис. 11. В качестве материала использовалась сталь 20, описанная ранее. и сталь 30ХГСА. Характеристики стали 30ХГСА представлены в табл. 3 и на рис. 12.

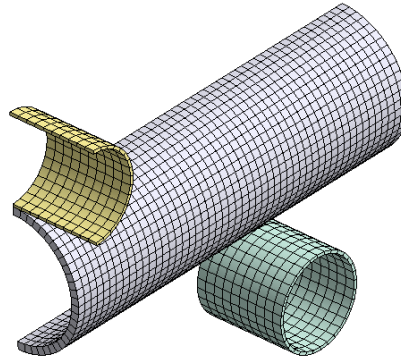


Рис. 11. КЭМ трубы с опорой и оправкой

Fig. 11. FEM of the bedded tube with a mandrel

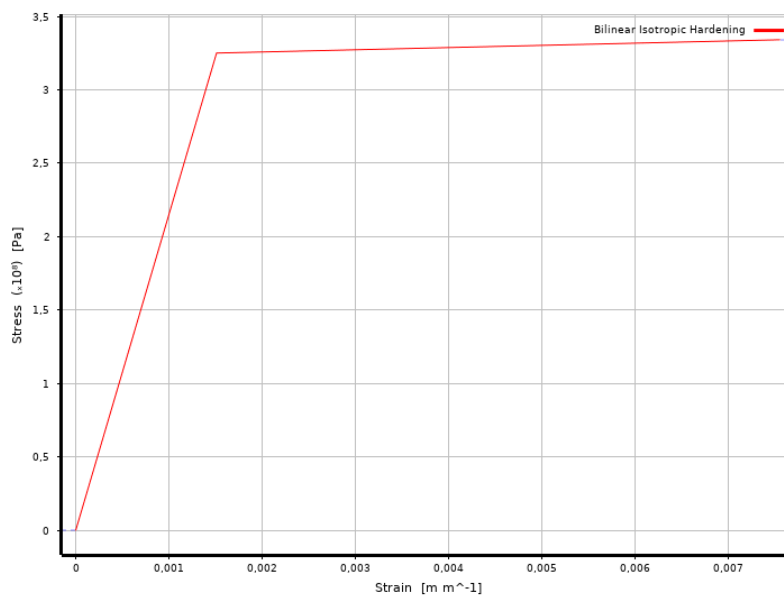
## Характеристика стали 30ХГСА

## Characteristic of steel 30ХГСА

Таблица 3.

Table 3.

	30ХГСА
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7850
Коэффициент Пуассона	0,3
Модуль Юнга, ГПа	215
Предел текучести, МПа	325
Предел прочности, МПа	491
Относительное удлинение, %	18

Рис. 12. Билинейная характеристика стали 30ХГСА ( $E_t = 1500$  МПа)Fig. 12. Bilinear characteristic of steel 30ХГСА ( $E_t = 1500$  МПа)

Деформированное состояние представлено на рис. 13.



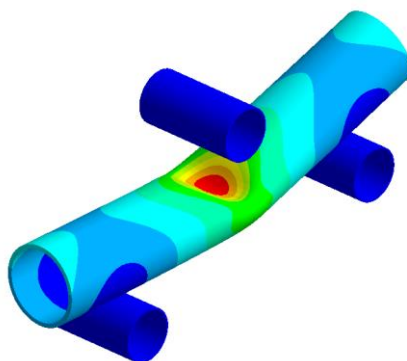


Рис. 13. Перемещения в трубе под нагрузкой

Fig. 13. Displacements in a loaded tube

На рис. 14 представлены расчетные кривые, показывающие зависимость силы реакции от перемещения нагружающего элемента.

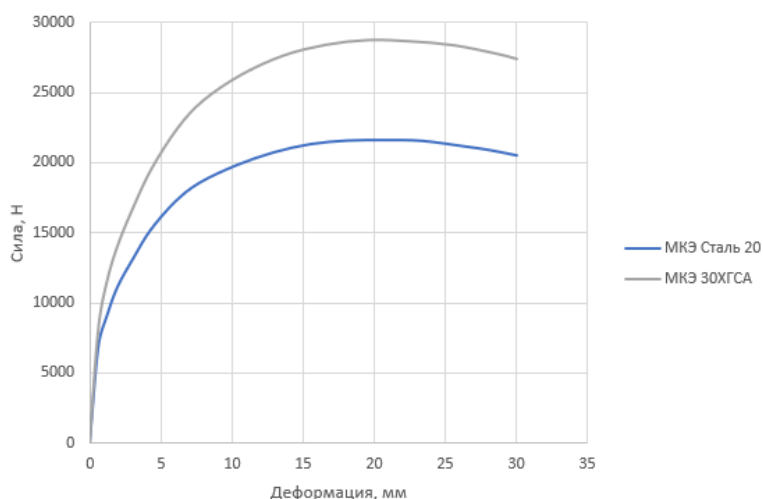


Рис. 14. Кривые нагружения при расчете МКЭ

Fig. 14. Load curves for FEM calculation

Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4.

Результаты расчета трехточечного изгиба МКЭ

Table 4.

Results of the FEM three-point bending calculation

Труба	Максимальное воспринимаемое усилие, Н
45 мм x 2,5 мм Сталь 20	21605
45 мм x 2,5 мм 30ХГСА	28705

Анализ показал, что труба из стали 30ХГСА воспринимает нагрузку на 24 % большую, чем труба из стали 20. Следовательно, можно предположить, что в случае применения труб из стали 30ХГСА при изготовлении каркаса безопасности, можно улучшить жесткостные характеристики, что, в свою очередь, положительно скажется на прохождении каркасом регламентированных испытаний.

### Верификация конечно-элементного моделирования

В целях верификации проведены натурные эксперименты с четырьмя образцами труб: образец 1,2 – труба 45 мм х 2,5 мм сталь 20; образец 3,4 – труба 45 мм х 2,5 мм сталь 30ХГСА. Образец 1 показан на рис. 15.



Рис. 15. Исходное состояние испытуемой трубы

Fig. 15. Initial condition of the tested tube

Трехточечный изгиб проводился на испытательной машине Zwick Z100 (рис. 16) согласно схеме, представленной на рис. 10. В процессе испытания посредством скругленной оправки со скоростью 5 мм/мин на трубу передавалась нагрузка, которая измерялась при помощи датчиков установки и выводилась с помощью программного обеспечения. В табл. 5 и на рис. 17 представлены результаты эксперимента.



Рис. 16. Испытательная машина Zwick Z100

Fig. 16. Zwick Z100 testing machine

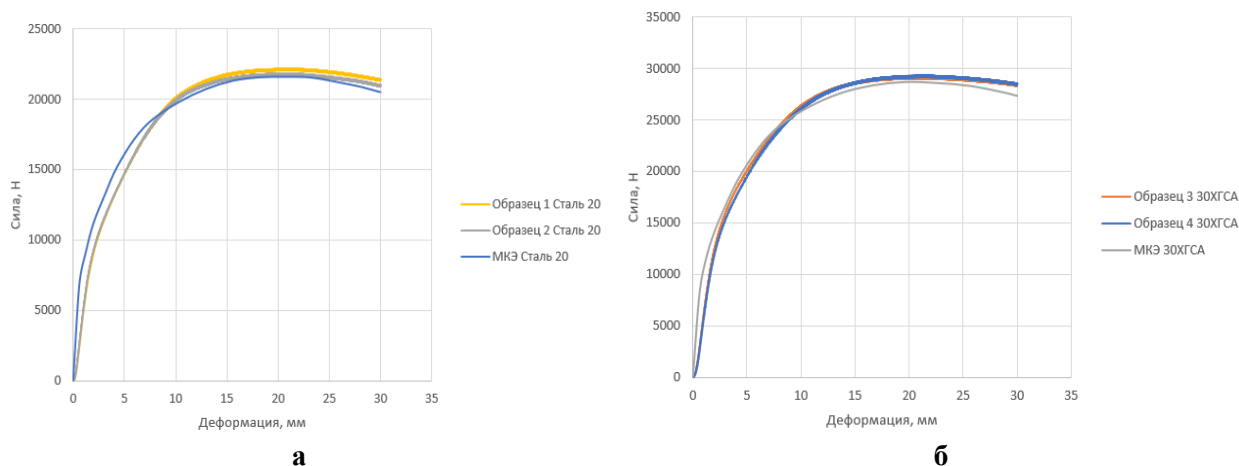
#### Результаты эксперимента

Таблица 5.

#### Results of the experiment

Table 5.

Труба	Номер образца	Максимальное воспринимаемое усилие, Н
45 мм х 2,5 мм Сталь 20	1	22113
	2	21775
45 мм х 2,5 мм 30ХГСА	3	29108
	4	29252



**Рис. 17.** Диаграммы нагружения образцов труб: *а* – Сталь 20; *б* – 30ХГСА

**Fig. 17.** Load curves for tube samples: *a* – Steel 20; *б* – 30ХГСА

На рис. 18 показано деформированное состояние образца 1 после проведения натурного эксперимента. На рис. 19 показано деформированное состояние всех четырех образцов.



**Рис. 18.** Деформированное состояние образца 1

**Fig. 18.** Strained condition of sample 1



**Рис. 19.** Трубы после натурного эксперимента

**Fig. 19.** Tubes after the full-scale experiment

Анализа результатов показывает, что предложенная КЭМ дает приемлемую точность при моделировании, так как максимальная погрешность не превышает 9 %. Необходимо отметить, что при перемещении более 25 мм воспринимаемая нагрузка уменьшается, и трубы теряют свою несущую способность.

### Заключение

Разработана конечно-элементная модель каркаса безопасности спортивного автомобиля и трубы, применяемой при изготовлении силовых конструкций каркасов безопасности. Проведено моделирование испытания на трехточечный изгиб. С целью верификации проведен натурный эксперимент.

1. КЭМ показывает поведение тонкостенных труб с погрешностью не более 9 %, что подтверждает ее применимость для многовариантных расчетов.
2. При выборе материала труб для изготовления силовых конструкций каркасов следует оценивать целесообразность применения легированных сталей с точки зрения улучшения технических характеристик и увеличения стоимости конструкции (труба из стали 30ХГСА воспринимает максимальную нагрузку на 24 % больше, чем труба из стали 20; стоимость одного метра трубы из стали 30ХГСА на 37 % выше, чем трубы из стали 20).

3. Топологическая оптимизация конструкции каркаса может улучшить характеристики в сравнении с конструкцией, выполненной по регламенту РАФ.

### Библиографический список

1. Оборудование безопасности: приложение J. Статья 253. [Электронный ресурс] // Режим доступа <http://www.raf.su/kst/category/74-prilozheniya-j> (дата обращения 15.05.2022).
2. **Шабан, Б.А.** Особенности моделирования каркасных элементов кузовов и кабин автомобилей при исследовании пассивной безопасности / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование: научное издание НГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 11. С. 81-104.
3. **Шабан, Б.А.** Анализ влияния конструктивных факторов кабины на пассивную безопасность грузовых автомобилей при ударе по передним стойкам / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование: научное издание НГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 11. С. 95-106.
4. **Шабан, Б.А.** Анализ влияния конструктивных факторов на пассивную безопасность кабины грузового автомобиля при фронтальном ударе / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование: научное издание НГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 8. С. 91-108.
5. **Гончаров, Р.Б.** Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2018. № 3 (122). С. 130-136.
6. **Гончаров, Р.Б.** Проблемы поиска оптимальных решений для обеспечения пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при минимальной массе / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Известия МГТУ «МАМИ». 2018. № 4 (38). С. 92-102.
7. **Зузов, В. Н.** Исследование влияния на энергоемкость основных силовых элементов кузова автомобиля в зоне бокового удара / В.Н. Зузов, Д.А. Сулегин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2020. Т. 20. № 4. С. 20-34.
8. **Сулегин, Д.А.** Исследование влияния усиливающих элементов двери автомобиля на пассивную безопасность при боковом ударе / Д.А. Сулегин, В.Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2021. № 1(132). С. 86-97.
9. **Гончаров, Р.Б.** Моделирование поведения тонкостенных труб с разными наполнителями при предельном нагружении применительно к решению проблем пассивной безопасности автомобилей / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов, Д.Н. Чайко // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 3(87). С. 3.
10. **Sarang Chandrakant Saraf.** Design & Experimentation of Side Impact Beam for Hyundai Verna / Sarang Chandrakant Saraf, Prashantkumar S. Vajaj. [Electronic resource]. Access mode: <https://irjet.org/volume-4-issue-06-june-2017>
11. **Aditya Kumar Mohanty.** Design and Development of Roll Cage: A Review / Aditya Kumar Mohanty, Ankit Jambhulkar, Bhupesh Sarode [Electronic resource]. Access mode: <https://irjet.org/volume-5-issue-03-mar-2018>
12. **Сорокин, В.Г.** Стали и сплавы. Марочник: Справ. изд. / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 608 с.
13. **Шабан, Б.А.** Особенности построения конечно-элементных моделей кабин для исследования пассивной безопасности при ударе в соответствии с правилами ЕЭК ООН № 29 / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 3. С. 129-156.
14. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учеб. пособие / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов. – Н. Новгород: НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2014. – 144 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 12.10.2022*

*Дата принятия  
к публикации: 01.12.2022*