



Оценка технического состояния металлических конструкций на основе компьютерного моделирования

И.Н. Рыжиков^{1✉}, А.Е. Балановский²

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – установление причин разрушения конструкций с помощью компьютерного моделирования на основе исследования их напряженно-деформированного состояния. Исходными данными для компьютерного моделирования являлись фотоматериалы с места происшествия, конструкторская документация, технические характеристики автомобиля (нагруженного пиломатериалами) и гидроножниц. Использовались программные комплексы APM WinMachine, NX и Autodesk Inventor. В качестве основного метода для исследований был выбран метод конечных элементов в перемещениях. Рассматривались различные версии появления трещины, были разработаны компьютерные модели и проведен инженерный анализ конструкции рамы автомобиля. С помощью компьютерного моделирования также была установлена наиболее вероятная причина разрушения верхней части гидроножниц – превышение критического (345 МПа – предел текучести стали 09Г2С) для данного материала уровня напряжений. Исследуемые конструкции отличались сложностью геометрии и разнообразием действующих на них нагрузок. При их моделировании были учтены сварные швы. В программных комплексах на основе метода конечных элементов были построены геометрические модели конструкций, включая сварные швы, на основе которых были сформированы и исследованы конечноэлементные модели конструкций. В результате проведенных расчетов напряженного состояния гидроножниц было определено максимальное значение напряжения (391 МПа), значительно превышающее предел текучести, а также локализация напряжений для разных случаев нагружения конструкции. Анализ результатов расчетов прочности и жесткости конструкций в используемых программных комплексах для всех моделей, разработанных для проверки рассматриваемых гипотез, позволил указать наиболее вероятные причины их разрушения. Разработанная методика, компьютерные модели и результаты проведенных исследований могут быть использованы при инженерно-технической экспертизе различных технических объектов.

Ключевые слова: техническое состояние, метод конечных элементов, сварная рама, гидроножницы, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, прочность

Благодарности. Авторы выражают благодарность за участие в данных исследованиях Н.А. Астафьевой и Н.О. Тютрину.

Для цитирования: Рыжиков И.Н., Балановский А.Е. Оценка технического состояния металлических конструкций на основе компьютерного моделирования // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 204–215. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-204-215>. EDN: ONYJLJ.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Technical condition assessment of metallic structures based on computer modelling

Igor N. Ryzhikov^{1✉}, Andrey E. Balanovsky²

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Objective – determination of the causes of structural failure using computer modelling based on stress-strain state analysis. The initial data for the computer modelling included photographic material from the site of the accident, design documentation and technical specifications of the vehicle (loaded with timber) and the hydraulic shears. The software packages used were APM WinMachine, NX and Autodesk Inventor. The Finite Element Method in displacements was selected as the primary research method. Various crack initiation scenarios were considered, computer models were developed and an engineering analysis of the vehicle frame structure was performed. Computer modelling also identified the most likely cause of failure of the upper part of the hydraulic shear – exceeding the critical stress level (345 MPa, the yield strength of the 09G2S steel) for the material. The studied

structures were characterised by complex geometries and a variety of loads acting on them. Welded seams were considered in their modelling. Geometric models of the structures, including the welded seams, were created in the software packages using the finite element method. On this basis finite element models of the structures were developed and analysed. As a result of the stress state calculations for the hydraulic shear, the maximum stress value (391 MPa), which is significantly higher than the yield strength, and the stress localisation for different loading cases were determined. Analysis of the results of the strength and stiffness calculations for all the models developed were used to test the hypotheses considered in the software packages. This made allowed identification of the most probable causes of failure. The developed methodology, along with the computer models and the results obtained, can be applied in the engineering and technical analysis of a variety of technical objects.

Keywords: technical condition, finite element method, welded frame, hydraulic shears, computer modeling, stress-strain state, strength

Acknowledgments. The authors thank N.A. Astafieva and N.O. Tyutrin for their participation in the present research.

For citation: Ryzhikov I.N., Balanovsky A.E. Technical condition assessment of metallic structures based on computer modelling. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):204-215. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-204-215>. EDN: ONYJLJ.

ВВЕДЕНИЕ

Современная судебная инженерно-техническая экспертиза (ИТЭ) является не только процессуальным действием, но и полноценным научным исследованием на основе использования таких научных методов, как анализ, моделирование и др. [1]. Методы анализа и моделирования играют важную роль в инженерно-технической экспертизе, позволяя более глубоко исследовать технические объекты и процессы, что, в свою очередь, способствует установлению причин отказов техники. Эти методы основаны на использовании математических моделей и компьютерных технологий.

В рамках ИТЭ часто прибегают к компьютерному моделированию [2]. Компьютерное моделирование в современных программных комплексах на основе метода конечных элементов (МКЭ) широко применяется для анализа прочности и жесткости различных конструкций, в частности конструкций автомобильного транспорта. Современное программное обеспечение на основе МКЭ позволяет проводить с достаточно высокой точностью виртуальные краш-тесты разрабатываемых автомобилей, учитывая при этом всю историю нагружений материала деталей конструкции на разных стадиях их изготовления и сборки. Из множества публикаций в области конечноэлементного анализа прочности конструкций можно отметить работы³ [3–27].

В данной статье представлены результаты компьютерного моделирования двух конструкций: рамы грузового автомобиля и верх-

ней части гидроразрывной. В случае с груженым пилотом материалами автомобилем рассматривались две версии появления трещины:

1) в результате совершенного дорожно-транспортного происшествия (ДТП) (переезда бордюра и наезда на ограду);

2) в результате эвакуации автомобиля методом частичной погрузки. В соответствии с этими версиями были разработаны компьютерные модели и проведен инженерный анализ конструкции рамы автомобиля. Компьютерное моделирование верхней части гидроразрывной также проводилось с целью установления наиболее вероятной причины их разрушения.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) рамы использовался МКЭ в перемещениях, основные положения которого лежат в основе программных комплексов инженерного анализа конструкций NX и Autodesk Inventor. Основная идея МКЭ состоит в замене дифференциального уравнения в частных производных, описывающего физический процесс, системой линейных алгебраических уравнений, легко решаемой компьютером. При анализе методом конечных элементов вводится допущение, что соотношение между перемещениями точек тела U и силами, приложенными к телу F , является линейным и однородным. Это соотношение выражается следующим уравнением:

³Лагерева А.В., Вершинский А.В., Лагерева И.А., Шубин А.Н. Подъемно-транспортные машины: расчет металлических конструкций методом конечных элементов: учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2023. 178 с.

$$F = KU, \quad (1)$$

где F – вектор нагрузок, Н; K – глобальная матрица коэффициентов жесткости конструкции; U – вектор узловых перемещений, мм.

В матричном виде соотношение (1) можно записать следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdot & K_{1i} & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdot & K_{2i} & K_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{i1} & K_{i2} & \cdot & K_{ii} & K_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdot & K_{ni} & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix}.$$

В самом общем случае в каждом узле конечно-элементной модели могут действовать еще и моменты относительно координатных осей. В этом случае блоки узловых сил и перемещений для каждого узла будут состоять из шести компонент: трех моментов M и трех углов поворота Γ :

$$F_i = \{F_{ix} \ F_{iy} \ F_{iz} \ M_{ix} \ M_{iy} \ M_{iz}\};$$

$$U_i = \{U_{ix} \ U_{iy} \ U_{iz} \ \Gamma_{ix} \ \Gamma_{iy} \ \Gamma_{iz}\}.$$

Поле деформаций ε можно выразить через степени свободы узлов элемента $\{u\}$ посредством дифференцирования поля перемещений:

$$\varepsilon = [D]\{u\},$$

где матрица дифференцирования.

Соответственно, чтобы рассчитать поле напряжений, необходимо связать напряжения с деформациями, а через них – с найденными ранее узловыми перемещениями:

$$\sigma = [H]\varepsilon$$

или

$$\sigma = [H][D]\{u\}.$$

Матрица $[H]$ содержит коэффициенты, описывающие механические характеристики заданного конструкционного материала.

При компьютерном моделировании с помощью программного комплекса на основе метода конечных элементов основными этапами являются:

- создание геометрической модели;
- дискретизация геометрической модели (построение конечноэлементной сетки);
- приложение нагрузки;
- наложение условий закрепления (граничных условий);
- расчет;
- анализ результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ напряженно-деформированного состояния рамы автомобиля. В рамках данной работы было исследовано НДС рамы автомобиля при действии различных нагрузок с целью установления причины появления трещины. Грузовый пиломатериалом автомобиль Nissan Diesel совершил дорожно-транспортное происшествие – переехал бордюр и сломал ограду (рис. 1). После ДТП эвакуация происходила методом частичной погрузки (см. рис. 1). Грузовик закатывали на эвакуатор при помощи лебедки за передние такелажные крюки под углом 23° .

Впоследствии при осмотре автомобиля была обнаружена трещина в раме справа за передней осью (рис. 2).

Для ответа на вопрос (в отчете), что послужило истинной причиной появления трещины – эвакуация перегруженного автомобиля или переезд им бордюра – была назначена ИТЭ. В рамках судебной ИТЭ было проведено компьютерное моделирование НДС конструкции рамы автомобиля в программных комплексах NX и Autodesk Inventor.

Рама автомобиля (рис. 3) лонжеронной конструкции состоит из двух лонжеронов (продольных балок) П-образного профиля, соединенных между собой посредством сварки отдельными поперечинами, профиль которых – двутавр. Для лонжеронов в модели был принят швеллер 210х57х4 ГОСТ 8278-83⁴ из стали Ст 20 ГОСТ 1050-2013⁵, для поперечин – двутавр 20 из той же стали.

⁴ГОСТ 8278-83. Швеллеры стальные гнутые равнополочные. Сортамент. Введ. 01.01.1984 (изм. 01.01.1989; 01.04.2003). М.: Стандартинформ, 2003.

⁵ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. Введ. 01.01.2015 (изм. 23.08.2021). М.: Стандартинформ, 2022.



Рис. 1. Фото с места дорожно-транспортного происшествия (а) и эвакуация автомобиля (б)
Fig. 1. Photos from the traffic accident scene (a) and vehicle evacuation (b)

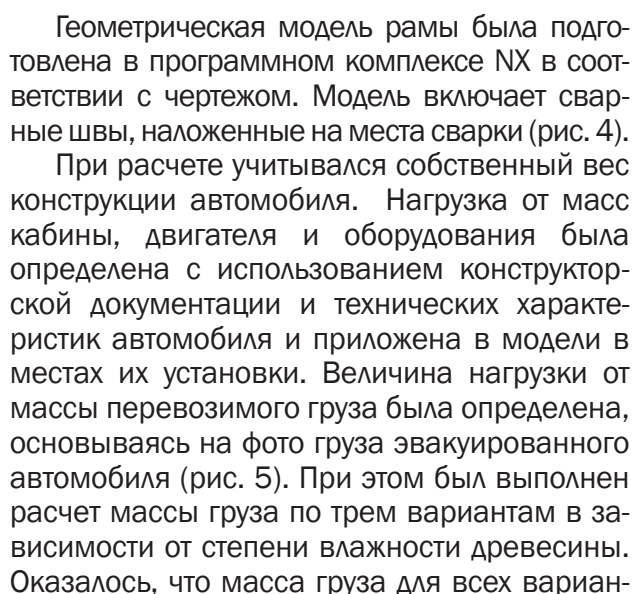


Рис. 2. Трещина в раме, обнаруженная после его эвакуации с места дорожно-транспортного происшествия
Fig. 2. A crack in the frame discovered after vehicle evacuation from the traffic accident scene



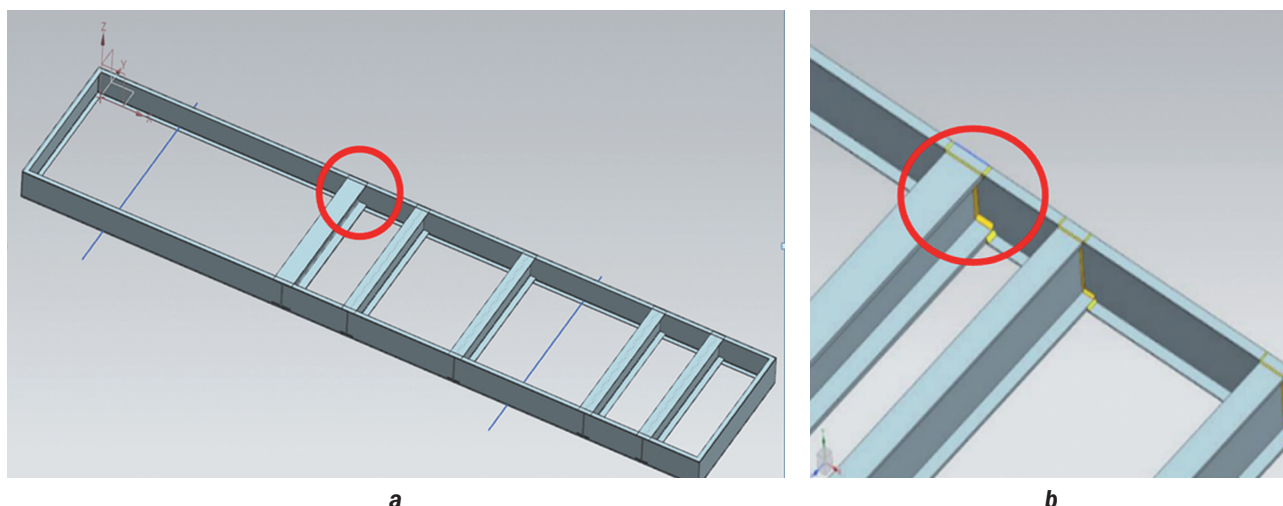


Рис. 4. Геометрическая модель рамы автомобиля с учетом сварных швов (а) и место разрушения (b)
Fig. 4. Geometric model of the vehicle frame taking into account welds (a) and failure spot (b)

тов существенно превышала грузоподъемность данного автомобиля, которая составляет 4565 кг. В дальнейших расчетах была принята минимальная величина массы груза (для сухой древесины), равная 4683 кг.

В соответствии с двумя основными версиями расследуемого события (повреждение рамы при эвакуации или повреждение рамы при ДТП) были подготовлены две расчетные схемы нагруженной рамы:

1) нагруженная рама под углом 23° (моделирование погрузки груженого автомобиля на эвакуатор);

2) нагруженная рама с опорами на переднее правое и заднее левое колеса (моделирование переезда бордюра).

Для обеих расчетных схем были приняты следующие граничные условия:

– для передней оси автомобиля – жесткое закрепление рамы в месте расположения данной оси;

– в месте расположения задней оси – закрепление, позволяющее раме линейно перемещаться вдоль своей оси, а также допускающее поворот вокруг задней оси.

Конечно-элементная модель в обоих случаях была сформирована из стержневых конечных элементов, которым был задан соответствующий профиль (швеллер или двутавр). Была проверена сходимость результатов расчетов для трех разных сеток конечных элементов, содержащих 19, 38 и 57 стержневых элементов. Различие в итоговых показателях первых двух составило более 30%, а двух последних – менее 10%, что говорит о достаточно близких результатах, т.е. указывает на их сходимость. Для расчетов была применена конечно-элементная модель, содержащая 57 стержневых элементов.

Как показал анализ результатов расчетов первой модели, максимальные напряжения в раме при погрузке автомобиля на эвакуатор



а



б

Рис. 5. К определению нагрузки от массы перевозимого груза: а – от массы бруса; б – от массы досок

Fig. 5. Determination of load vs weight of the cargo transported: a – from the mass of the beams; b – from the mass of the boards

составили 65,13 МПа, что значительно ниже предела текучести материала рамы (рис. 6). К тому же они возникали в районе задней оси. В этой связи можно утверждать, что погрузка и эвакуация груженого автомобиля не могли привести к возникновению трещины в его раме.

Расчет второй модели показал, что рама при переезде бордюра работает на скручивание (рис. 7). На том же рис. 7 представлена карта рассчитанных перемещений рамы при приложенной нагрузке от массы оборудования и груза. Ударная нагрузка при этом не учитывалась.

Однако даже без учета ударной нагрузки максимальные напряжения составляют 840 МПа, что значительно превышает предел текучести материала рамы.

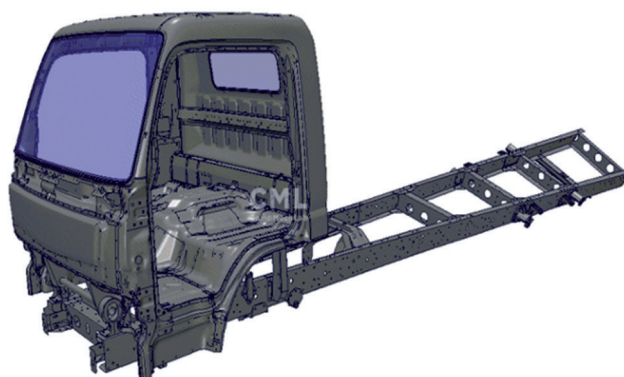
При этом на карте напряжений наблюдается четкая локализация максимальных напряжений в месте обнаружения трещины (рис. 8).

Анализ результатов расчета НДС рамы дает основание утверждать, что истинной причиной возникновения трещины в раме стал переезд перегруженного автомобиля через бордюр.

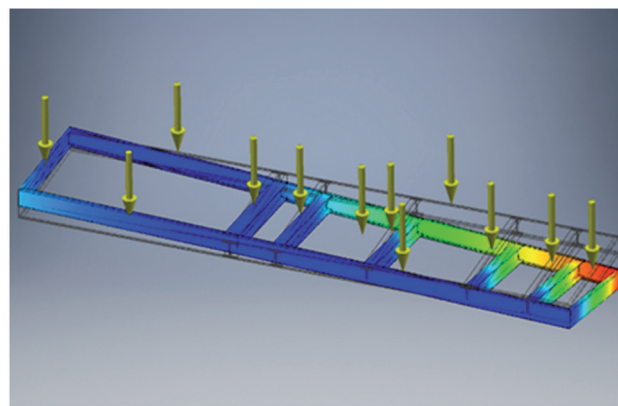
Анализ напряженно-деформированного состояния верхней части гидроножниц.

Второй задачей в рамках данной работы было установление причины разрушения верхней части гидроножниц после введения их в эксплуатацию. Повторному разрушению в том же месте эта конструкция подверглась после ремонта с применением сварки (рис. 9).

Ознакомившись с конструкцией и принципом ее работы, можно сделать вывод, что



a



b

Рис. 7. Деформации рамы автомобиля (а) и результаты расчета перемещений при переезде через бордюр (b)

Fig. 7. Vehicle frame deformations (a) and calculation results of movements when driving over the curb (b)

верхняя часть гидроножниц испытывает при работе сложное напряженное состояние.

В этом случае необходимо определить эквивалентные напряжения, при расчете кото-

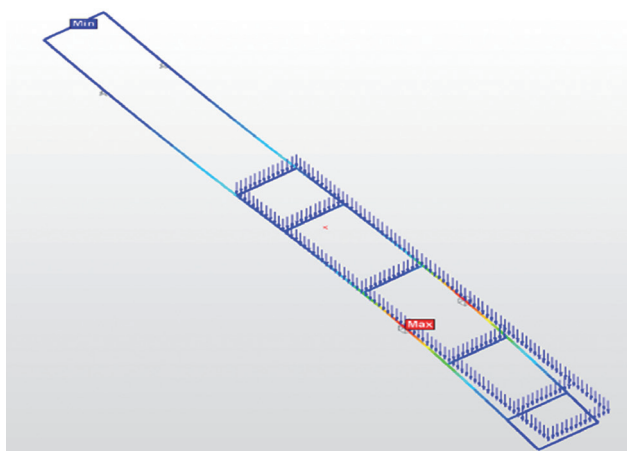


Рис. 6. Напряжения в раме автомобиля при его эвакуации. Максимальное напряжение составило 65,13 МПа

Fig. 6. Frame stresses during vehicle evacuation. Maximum stress is 65.13 MPa

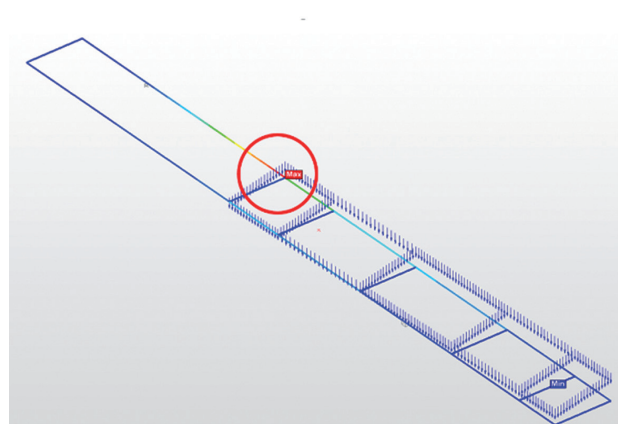


Рис. 8. Результаты расчета напряжений в раме автомобиля при переезде через бордюр. Максимальные напряжения составили 840 МПа

Fig. 8. Calculation results of stresses in the vehicle frame when driving over the curb. Maximum stress is 840 MPa



a



b

Рис. 9. Фото с указанием места возникновения трещины: а – место возникновения трещины; б – трещина крупным планом

Fig. 9. An image with indicated crack location: a – location of crack occurrence; b – close-up of crack

рых учитываются нормальные напряжения, возникающие при растяжении-сжатии и изгибе, а также касательные напряжения при сдвиге.

Учитывая массивную (явно трехмерную) конструкцию детали с поперечными сечениями большой площади и направление нагрузки от штока гидроцилиндра, можно с достаточной долей уверенности сказать, что доля растягивающих напряжений будет незначительной, а изгибная и сдвиговая составляющие будут преобладающими.

Изгиб является наиболее опасным с точки зрения прочности видом деформации, характеризующимся неравномерным распределением напряжений по сечению детали и

приводящим к возникновению максимальных напряжений у поверхности.

Твердотельная геометрическая модель построена в модуле APM Studio. На рис. 10 показаны:

- модель верхней части гидронажниц (а);
- оси шарнира (b);
- верхней части в сборе (с).

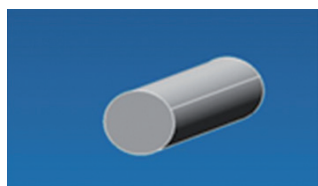
Конечноэлементная сетка представлена на рис. 11. Она содержит 37234 конечных элемента (10-узловых гексаэдров) и 64049 узла.

Рассмотрим исходные данные для расчета.

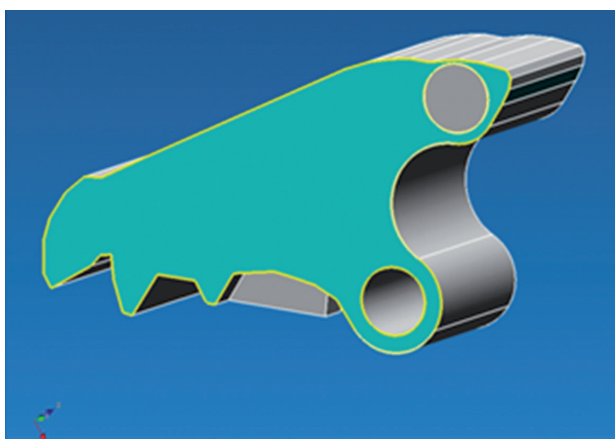
Давление в гидросистеме – 350 кг/см² (34,32 МПа), диаметр гидроцилиндра наруж-



a



b



c

Рис. 10. Твердотельная геометрическая модель: а – верхняя часть гидронажниц; б – ось шарнира; с – верхняя часть в сборе

Fig. 10. Solid geometric model: a – upper part of hydraulic shears; b – hinge axis; c – upper part assembled

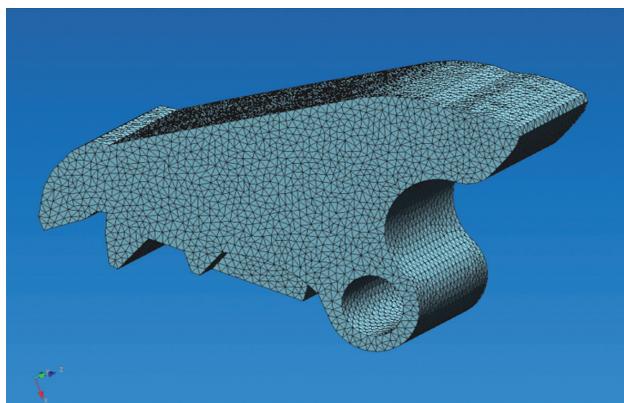


Рис. 11. Конечноеэлементная сетка
Fig. 11. Finite element mesh

ный – 280 мм (для расчета принимаем диаметр поршня, равный 260 мм).

Расчет нагрузки выполнен по формуле:

$$F = P \cdot A,$$

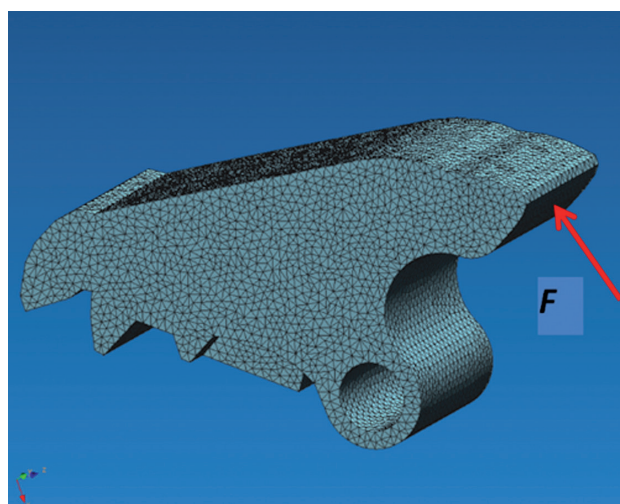
где F – сила со стороны штока, Н; P – давление в гидроцилиндре, Па; A – площадь сечения поршня, м². По расчету усилие F на штоке составило 1857 кН.

Максимальные напряжения изгиба возникнут в случае большого плеча и малой площади поперечного сечения в основании (в месте закрепления). Такой предполагаемый случай изображен на рис. 12, когда измельчаемый (разрушаемый) материал строительных конструкций оказался максимально близко к нижнему шарниру и зазор в отверстии этого шарнира нулевой (ось шарнира прижата) в нижней части внутренней поверхности отверстия. На рис. 12 показаны место приложения и направление силы F , а также граничные условия, соответствующие описанному случаю.

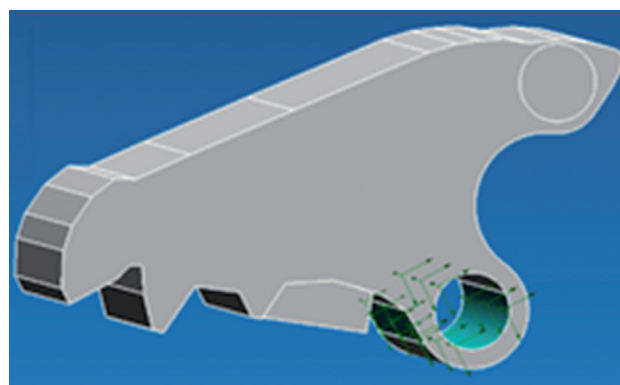
Были проведены расчеты при значениях F : 1400 кН, 1600 кН и 1857 кН. На рис. 13 представлены результаты расчета эквивалентных напряжений для наиболее нагруженного случая. Как видно из рис. 13, максимальные напряжения возникают в месте, соответствующем месту разрушения.

На диаграмме рис. 14 представлено сравнение результатов расчетов максимальных напряжений при разных нагрузках и пределов текучести стали 20 и 09Г2С.

На данной диаграмме видно, что при максимальной нагрузке в материале в месте разрушения возникают напряжения,



a



b

Рис. 12. Приложение нагрузки (a) и граничные условия (b)
Fig. 12. Load application (a) and boundary conditions (b)

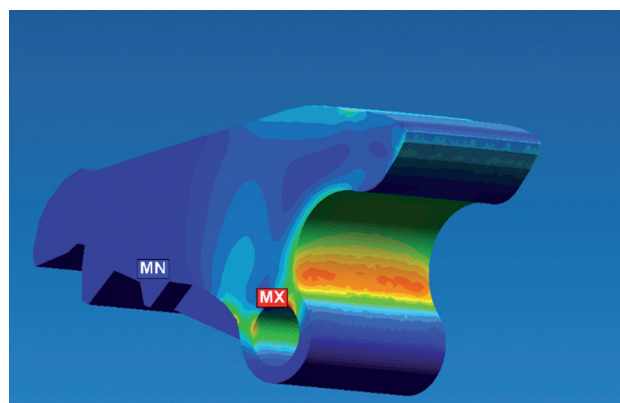


Рис. 13. Результаты при силе 1857000 Н. Максимальное напряжение составило 391 МПа

Fig. 13. Results at the force of 1857000 Н. Maximum stress is 391 MPa

превышающие пределы текучести применяемых для данной конструкции материалов: стали 20 и стали 09Г2С. Из сказанного можно сделать вывод о том, что прочност-

Максимальные
напряжения, МПа

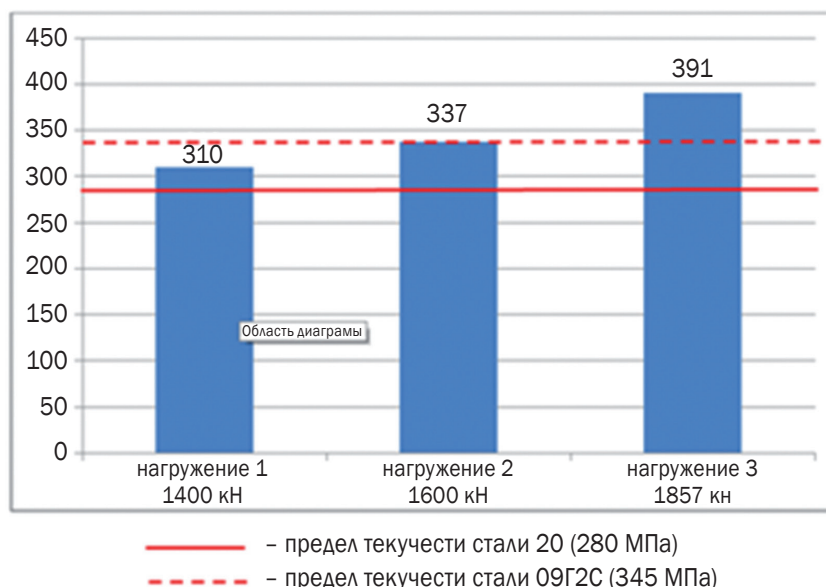


Рис. 14. Сравнение результатов расчетов

Fig. 14. Comparison of calculation results

ные характеристики данных материалов недостаточны для изготовления подобных конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование НДС конструкций рамы автомобиля и гидроножниц с целью установления причин их разрушения. В результате анализа результатов компьютерного моделирования данных конструкций установлено нижеследующее:

- в случае с разрушением рамы автомобиля наиболее вероятной причиной

появления в ней трещины является переезд перегруженного автомобиля через бордюр;

- в случае с разрушением верхней части гидроножниц наиболее вероятной причиной разрушения явился выбор материала с недостаточно высокими механическими характеристиками для изготовления данной конструкции.

Разработанные компьютерные модели и результаты проведенных исследований могут быть использованы при инженерно-технической экспертизе различных технических объектов.

Список источников

1. Щербakov А.П., Иванов Д.В. Особенности проведения судебных инженерно-технических экспертиз при исследовании сварных соединений рабочего органа ножа автогрейдера: монография. СПб.: СПбГАСУ, 2022. 292 с. EDN: HOSQMO.
2. Шавлюга А.А., Таратанов Н.А., Карасев Е.В., Калашников Д.В. Применение программных комплексов для установления обстоятельств пожара // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 3. С. 78–85. EDN: YOCMWV.
3. Parmar R.S. Welding engineering and technology. Yayımcı: Khanna Publishers, 2010. 1374 p.
4. Polakowski N.H., Ripling F.J. Strength and structure of engineering materials. New Jersey: Prentice-Hall, 1966. 535 p.
5. Repetskiy O., Ryzhikov I., Lutaenko N., Latin A. Vibration of mistimed bladed discs // Futures in Mechanics of Structures and Materials: Proceedings of the 20th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (Toowoomba, 2–5 December 2008). Toowoomba: QLD, 2008. P. 719–722. EDN: MWCKFW.
6. Maksimow V., Petukhov E., Jankovic D. Determination of semitrailers supporting units loading with pliancy elastic suspension brackets elements calculations // XV Conference Science and motor vehicles (Belgrad, 15–18 May 1995). Belgrad, 1995. P. 141–143.
7. Барышников Ю.Н. Расчет нагрузок на несущую систему транспортных средств // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 12. С. 11. EDN: RSGRZL.
8. Пыхалов А.А., Милов А.Е. Контактная задача статистического и динамического анализа сборочных роторов турбомашин: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 190 с. EDN: OWXBOJ.

9. Антипин С.А., Пыхалов А.А., Пашков А.А. Определение параметров искажений форм геометрии маложестких крупногабаритных деталей с учетом влияния на них силы собственного веса и условий закрепления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 3. С. 175–184. <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2024.20.3.027>. EDN: ENKUER.
10. Барышников Ю.Н. Проблемы создания математических моделей для расчета несущих систем карьерных самосвалов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-2. С. 54–56. EDN: QLILIF.
11. Бусел Б.У. Категории карьерных дорог // Автомобильная промышленность. 2003. № 2. С. 17–19.
12. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел: монография. Харьков: Основа, 1991. 272 с.
13. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике / пер. с англ.; под ред. Б.Е. Победри. М.: Мир, 1975. 541 с.
14. Испеньков С.А., Ракицкий А.А. Моделирование динамического поведения карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности в среде ANSYS // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. Минск: БНТУ, 2010. Вып. 25. С. 295–300.
15. Мариев П.Л., Кулешов А.А., Егоров А.Н., Зырянов И.В. Карьерный автотранспорт стран СНГ в XXI веке. СПб.: Наука, 2006. 387 с.
16. Мазурин А. SCAN: от проектирования до компьютерного анализа и стендовых испытаний // САПР и графика. 2001. № 6. С. 23–24.
17. Repetskiy O., Ryzhikov I., Schmidt R. Investigations of impact of various types of mistuning on bladed disks vibration and fatigue life // 8th Iftomm International Conference on Rotor Dynamics 2010 (Seoul, 12 September – 15 October, 2010). Seoul: Curran Associates, 2012. Vol. 1. P. 603. EDN: XHWKXE.
18. Шермухамедов А.А., Усманов И.И., Салимджанов Р.Т., Тогаев А.А. Методы расчета и испытания автотракторных прицепов отечественного производства: монография. Ташкент: ТАДИ, 2012. 132 с.
19. Щербак О.В., Бойко С.И., Дибров Е.И., Гуменюк И.А. Оценка прочности несущих систем спецтехники, созданных на базе автомобильных шасси // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2014. Вып. 65-66. С. 135–138.
20. Яценко Н.Н. Форсированные полигонные испытания грузовых автомобилей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. 328 с.
21. Лагерева И.А. Методика моделирования эксплуатационной нагруженности металлоконструкции мостового крана // Наука и производство 2009: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Брянск, 19–20 марта 2009 г.). Брянск: БГТУ, 2009. С. 312–314.
22. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Рабочие механизмы строительных машин и способы технологического обеспечения прочности сварных соединений из высокопрочных сталей // Недвижимость: экономика, управление. 2020. № 1. С. 63–68. EDN: ECRNJJ.
23. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Оценка напряженно-деформированного состояния в зоне сварного соединения для рамы автопогрузчика // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». 2020. № 2. С. 93–101. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-44-2-93-101>. EDN: LNNLPK.
24. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Максимов С.Е. Замена материала рабочего органа как путь повышения надежности дорожно-строительных машин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 6. С. 646–661. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>. EDN: JSBBJP.
25. Scherbakov A., Babanina A., Breskich V., Klyovan V. The impact of external influences on the characteristics of metals of welded structures of construction machines // Interagromash 2021: Proceedings 14th International Scientific Conference. Rostov-on-Don: Springer, 2022. Vol. 247. P. 973–982. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_88. EDN: NHTRFA.
26. Еловенко Д.А., Репецкий О.В. Анализ напряженного состояния упругой полуплоскости, нагруженной постоянным давлением на ограниченных промежуточных участках с заданным периодом, методом конечных элементов на базе программного комплекса MSC.MARC // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2011. № 5. С. 171–175. EDN: OIGIKD.
27. Repetskiy O.V. Use of the FEM to solve the thermoelasticity problem of turbine blades // Strength of Materials. 1990. Vol. 22. No. 12. P. 1848–1854. <https://doi.org/10.1007/BF00769137>. EDN: XOJDLQ.

References

1. Shcherbakov A.P., Ivanov D.V. Features of conducting forensic engineering and technical examinations in the study of welded joints of the motor grader blade working body. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2022, 292 p. (In Russ.). EDN: HOSQMO.
2. Shavlyuga A.A., Taratanov N.A., Karasev E.V., Kalashnikov D.V. Application software systems to establish the circumstances of the fire. Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2017;3:78-85. (In Russ.). EDN: YOCMWV.
3. Parmar R.S. Welding engineering and technology. Yayımcı: Khanna Publishers; 2010, 1374 p.

4. Polakowski N.H., Rippling F.J. *Strength and structure of engineering materials*. New Jersey: Prentice-Hall; 1966, 535 p.
5. Repetskiy O., Ryzhikov I., Lutaenko N., Latin A. Vibration of mistimed bladed discs. In: *Futures in Mechanics of Structures and Materials: Proceedings of the 20th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*. 2–5 December 2008, Toowoomba. Toowoomba: QLD; 2008, p. 719-722. EDN: MWCKFW.
6. Maksimov V., Petukhov E., Jankovic D. Determination of semitrailers supporting units loading with pliancy elastic suspension brackets elements calculations. In: *XV Conference Science and motor vehicles*. 15–18 May 1995, Belgrad. Belgrad; 1995, p. 141-143.
7. Baryshnikov Yu.N. Calculation of loads on bearing system of vehicles. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013;12:11. (In Russ.). EDN: RSGRZL.
8. Pykhalov A.A., Milov A.E. *Contact problem of statistical and dynamic analysis of turbomachine assembly rotors*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2007, 190 p. (In Russ.). EDN: OWXBOJ.
9. Antipin S.A., Pyhalov A.A., Pashkov A.A. Defining geometry shape distortion parameters of low-rigidity large-sized parts, taking into account the influence on them the force of their own weight and fastening conditions. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2024;20(3):175-184. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2024.20.3.027>. EDN: EHKUER.
10. Baryshnikov Yu.N. The issues of developing mathematical models for calculation of bearing systems of large dump-body trucks. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011;4-2:54-56. (In Russ.). EDN: QLILIF.
11. Busel B.U. Categories of quarry road. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2003;2:17-19. (In Russ.).
12. Eremenko S.Yu. *Finite element methods in mechanics of deformable bodies*. Har'kov: Osnova; 1991, 272 p. (In Russ.).
13. Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. London, 1971 (Russ. ed.: *Metod konechnykh elementov v tekhnike*. Moscow: Mir; 1975, 541 p.)
14. Ispen'kov S.A., Rakickij A.A. Modeling the dynamic behavior of extra-heavy-duty quarry dump trucks in the ANSYS environment. In: *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhdunarodnyj nauchno-tekhnicheskij sbornik = Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection*. Minsk: Belarusian National Technical University; 2010, Iss. 25, p. 295-300. (In Russ.).
15. Mariev P.L., Kuleshov A.A., Egorov A.N., Zyryanov I.V. *Open-pit motor transport of the CIS countries in the 21st century*. Saint Petersburg: Nauka; 2006, 387 p. (In Russ.).
16. Mazurin A. SCAN: from design to computer analysis and bench testing. *SAPR i grafika*. 2001;6:23-24. (In Russ.).
17. Repetskiy O., Ryzhikov I., Schmidt R. Investigations of impact of various types of mistuning on bladed disks vibration and fatigue life. In: *8th Iftomm International Conference on Rotor Dynamics 2010*. 12 September – 15 October 2010, Seoul. Seoul: Curran Associates; 2012, vol. 1, p. 603. EDN: XHWKXE.
18. Shermukhamedov A.A., Usmanov I.I., Salimdzhanov R.T., Togaev A.A. *Methods of calculation and testing of domestically produced autotractor trailers*. Tashkent: Tashkent Automobile and Road Construction Institute; 2012, 132 p. (In Russ.).
19. Shcherbak O., Boiko S., Dibrov Ye., Gumeniuk I. Assessing the durability of the undercarriage of heavy construction equipment created on the basis of automobile and tractor chassis. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2014;65-66:135-138. (In Russ.).
20. Yatsenko N.N. *Forced field testing of trucks*. Moscow: Mashinostroenie; 1984, 328 p. (In Russ.).
21. Lagerev I.A. Modeling methodology for overhead crane metal structure operational load. In: *Nauka i proizvodstvo 2009: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Science and Production 2009: Proceedings of International scientific and practical conference*. 19–20 March 2009, Bryansk. Bryansk: Bryansk State Technical University; 2009, p. 312-314. (In Russ.).
22. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. Working mechanisms of construction machines and methods of technology-security of strength of welded joints from high-magnified steels. *Real estate: economics, management*. 2020;1:63-68. (In Russ.). EDN: ECRNJH.
23. Shcherbakov A.P., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. Assessment of the stress-strain state in the weld zone for the forklift truck frame. *Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2020;2:93-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-44-2-93-101>. EDN: LNNLPK.
24. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Maksimov S.E. Replacement working body material as a way to increase reliability of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(6):646-661. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>. EDN: JSBBJP.
25. Scherbakov A., Babanina A., Breskich V., Klyovan V. The impact of external influences on the characteristics of metals of welded structures of construction machines. In: *Interagromash 2021: Proceedings of 14th International Scientific Conference*. Rostov-on-Don: Springer; 2022, vol. 247, p. 973-982. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_88. EDN: NHTRFA.
26. Elovenko D.A., Repetskiy O.V. Analysis of stress state of elastic half-plane loaded with constant pressure at limited intermediate sections with specified period by finite element method based on MSC.MARC software. *Izvestiya of Irkutsk State Economic Academy*. 2011;5:171-175. (In Russ.). EDN: OIGIKD.
27. Repetskii O.V. Use of the FEM to solve the thermoelasticity problem of turbine blades. *Strength of Materials*. 1990;22(12):1848-1854. <https://doi.org/10.1007/BF00769137>. EDN: XOJDLQ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рыжиков Игорь Николаевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры материаловедения,
сварочных и аддитивных технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ rin111@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6105-0659>

Балановский Андрей Евгеньевич,
к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой материаловедения,
сварочных и аддитивных технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
fuco.64@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6466-6587>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.01.2025 г.; одобрена после рецензирования 28.02.2025 г.; принята к публикации 02.04.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor N. Ryzhikov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Materials Science, Welding and Additive Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ rin111@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6105-0659>

Andrey E. Balanovsky,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
fuco.64@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6466-6587>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 15.01.2025; approved after reviewing 28.02.2025; accepted for publication 02.04.2025.