

УДК 629.12:539.433

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_5

Оригинальное исследование



Экспериментальное определение центра кручения открытых тонкостенных профилей

А.Н. Андреев, Д.А. Николаев

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В отечественном машиностроении вопросы импортозамещения весьма актуальны. В последнее время при оптимизации конструктивно-технологических параметров элементов энергетических машин получили тонкостенные криволинейные поперечные сечения. Методика расчета прочностных характеристик для тонкостенного замкнутого профиля аналогична общераспространенным для расчета массивных профилей, однако для расчета сечений с незамкнутыми тонкостенными криволинейными профилями она ограничено применима, ввиду несовпадения центра кручения с центром масс площади сечения.

Цель — представить некоторые особенности деформированного состояния узлов и деталей различных энергетических машин и механизмов, имеющих незамкнутые тонкостенные криволинейные профили, работающих при различных видах деформации.

Методы. Описана методика разработанного универсального алгоритма для автоматизированного расчета основных жесткостных характеристик деформируемых открытых тонкостенных криволинейных профилей с определением центра изгиба-кручения. Рассмотрены варианты определения этих характеристик для прямолинейных тонкостенных и сложных тонкостенных криволинейных сечений элементов.

Результаты. Разработанная экспериментальная установка позволяет определять положение силовых плоскостей, линия пересечения которых задает положение центра изгиба, описана методика проведения экспериментов. Представлены экспериментальные данные по определению центра изгиба для произвольного открытого тонкостенного профиля, по которым построены графические зависимости влияния положения силовой плоскости и отклонения положения поперечного сечения от вертикального. Высокое совпадение теоретических и экспериментальных данных указывает на надежность разработанного алгоритма и программного обеспечения.

Выводы. На основании сопоставления расчетных теоретических координат с экспериментальными данными сделан вывод о высокой точности расчета разработанной электронной программы. Разработанная программа — не только эффективный инструмент для проектирования и расчета, но и может быть полезной для научных исследований, связанных с конструированием элементов машин и оборудования.

Ключевые слова: тонкостенный криволинейный профиль; центр изгиба; прочность; жесткость; кручение; сечение; деформация.

Как цитировать

Андреев А.Н., Николаев Д.А. Экспериментальное определение центра кручения открытых тонкостенных профилей // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 5–14. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_5

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_5

Original study article

Shear center determination of open light-gauge sections

Alexander N. Andreev, Dmitriy A. Nikolaev

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Import substitution issues are very topical in the domestic machine building industry. Recently, thin-walled curvilinear cross-sections have been obtained in the optimization of design and technological parameters thin-walled curvilinear cross-sections have been recently emphasized in the optimization of structural and technological parameters of power machine elements. The method of calculation of strength characteristics for a thin-walled closed profile is similar to those commonly used for the calculation of solid profiles, but for the calculation of sections with unclosed thin-walled curvilinear profiles it is limitedly applicable, due to the mismatch of the center of torsion with the center of mass of the section area.

AIM: To presents some highlights on the strain state of units and parts of various power machines and devices with curved light-gauge open profiles operating in various strain conditions.

METHODS: It describes the methodology of the proposed general algorithm for the automated calculation of the basic stiffness parameters of strained curved light-gauge open profiles with the determination of the shear center. It also reviews different options for determining these parameters for light-gauge line profiles and complex light-gauge profiles of components.

RESULTS: An experimental setup has been developed that allows to identify the planes of loading determining the shear center at their intersection. It shows experimental data on determining the shear center for a random light-gauge open profile. The data is used to develop the loading plane vs variation of the vertical cross section curves. The developed program is not only an effective tool for design and calculation, but also can be useful for scientific research related to the design of machine and equipment elements.

CONCLUSIONS: The author makes a conclusion on the high accuracy of calculations using the developed software by comparing the calculated analytical coordinates with experimental data. The developed program is not only an effective tool for design and calculation, but also can be useful for scientific research related to the design of machine and equipment elements.

Keywords: thin-walled curved profile; shear center; strength; stiffness; torsion; section; strain.

To cite this article

Andreev AN, Nikolaev DA. Shear center determination of open light-gauge sections. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):5–14. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_5

Received: 31.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 25.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

В отечественном машиностроении в последнее время, как известно, вопросы импортозамещения приобретают весьма актуальное значение. Процесс частичной или полной замены существующих зарубежных энергетических машин, узлов, механизмов и деталей на отечественные связан с полным циклом промышленного производства, от конструкторского проекта разработки до непосредственного промышленного изготовления в условиях именно собственного производства. На начальной стадии расчета и проектирования поиск оптимального конструкторского решения всегда является ключевой и первостепенной задачей [1–3]. При оптимизации конструктивно-технологических параметров элементов энергетических машин в последнее время получили тонкостенные криволинейные поперечные сечения, конструкции из которых имеют меньшую массу по сравнению с массивными сечениями, что и является в инженерных расчетах методом оптимального проектирования [4–6]. Методика расчета прочностных характеристик для тонкостенного замкнутого профиля аналогична общераспространенным методикам расчета массивных профилей, однако для расчета сечений с незамкнутыми тонкостенными криволинейными профилями она ограниченно применима, ввиду несовпадения центра кручения с центром масс площади сечения.

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

Фактором, резко снижающим жесткость незамкнутых тонкостенных криволинейных профилей, работающих на изгиб, является появление касательных напряжений в сечениях, приводящих к смене деформации изгиба на изгиб с кручением. Однако тонкостенные незамкнутые профили иначе работают на кручение, поэтому при проектировании конструкции нужно постараться избежать этого явления или контролировать его. Задачей является определение положения плоскости приложения нагрузки, в которой не будет деформации кручения. Теоретически данная плоскость проходит через линию, проведенную через центр кручения-изгиба, поэтому задача переходит в расчет координат этой точки для любого незамкнутого профиля. В любом случае, если не удастся избежать возможного кручения, его учет является качественно необходимым при анализе деформирования конструкции.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

В основу программы встроен модуль конструирования поперечных сечений конструкции. Модуль позволяет создавать массивные многосвязные и замкнутые в «кольцо» или открытые (не имеющие встроенных замкнутых участков) разветвленные тонкостенные профили сечения, как прямолинейного, так и криволинейного очертания. Расчет массивных профилей проводится по рисунку сечения

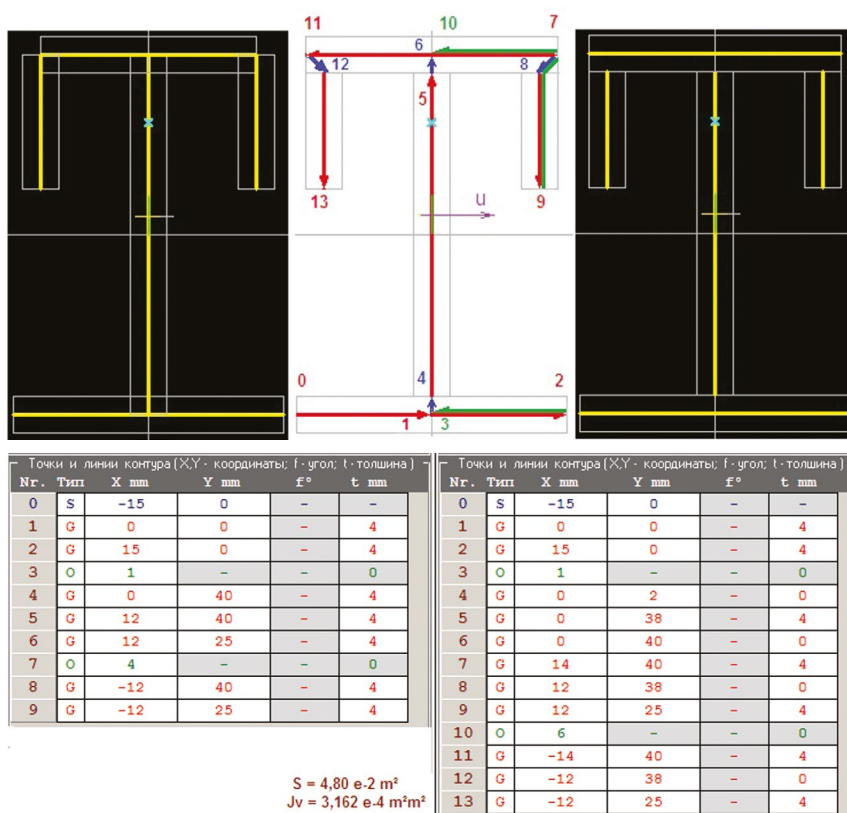


Рис. 1. Построение поперечного сечения профиля.
Fig. 1. Cross-sectioning process.

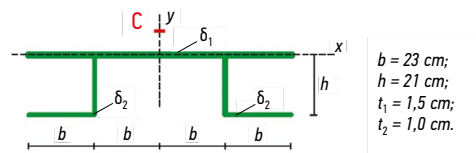
с разрешением 11 пикселей на единицу измерения. Число 11 выбрано в качестве компромисса между временем расчета и его погрешностью, которая составляет, как правило, менее 1 %. Предлагаемая программа предназначена для рисования (конструирования) и расчета основных характеристик массивных и незамкнутых тонкостенных прямолинейных и криволинейных поверхностей сечений.

На рис. 1 показана схема последовательности задания поперечного сечения линиями с разветвленным профилем. Позиции, имеющие тип «0», означают возврат в ранее отмеченную точку. Остальные позиции те же, что при изображении массивного контура с добавлением толщины линии. Для расчета тонкостенных криволинейных профилей использован существующий метод с дополнениями, позволившими автоматизировать расчет разветвленных профилей. Такие профили рассчитываются как одна непрерывная линия, некоторые участки которой могут иметь нулевую толщину, для большей наглядности программа изображает толщину листа. Отрезки нулевой толщины не рисуются, но присутствуют в таблице

участков профиля. Наличие этих элементов позволяет автоматизировать возврат в точку ветвления и избежать двойного учета накладывающихся площадей, что повышает достоверность рассчитанных характеристик.

Главной целью расчета является определение положения центра кручения-изгиба. На рис. 2 представлен расчет тонкостенного прямолинейного профиля. По алгоритму находим центр тяжести площади сечения и главные центральные оси инерции, которые затем используются для нахождения центра кручения. Нами проведено сравнение с расчетами некоторых тонкостенных незамкнутых профилей по существующим методикам, представленным в учебной литературе. Совпадение данных весьма высоко, что позволяет с уверенностью использовать программу для расчета многих типов тонкостенных профилей.

На сегодняшний момент актуальным является возможное распространение применяемого подхода к расчету основных геометрических характеристик элементов энергетических установок с сечением в виде сложного тонкостенного криволинейного профиля. Нами проведены



$$F = \sum_{i=1}^5 l_i \delta_i = 4b\delta_1 + 2(b+h)\delta_2 = 226 \text{ cm}^2.$$

$$J_{x_c} = J_x - y_c^2 F = 26460 - 6,23^2 \cdot 226 = 17700,49 \text{ cm}^4,$$

$$J_{y_c} = J_y - x_c^2 F = J_y = 176333,33 \text{ cm}^4.$$

$$C_x = 0 \text{ cm}; \quad C_y = 3,26 \text{ cm}.$$

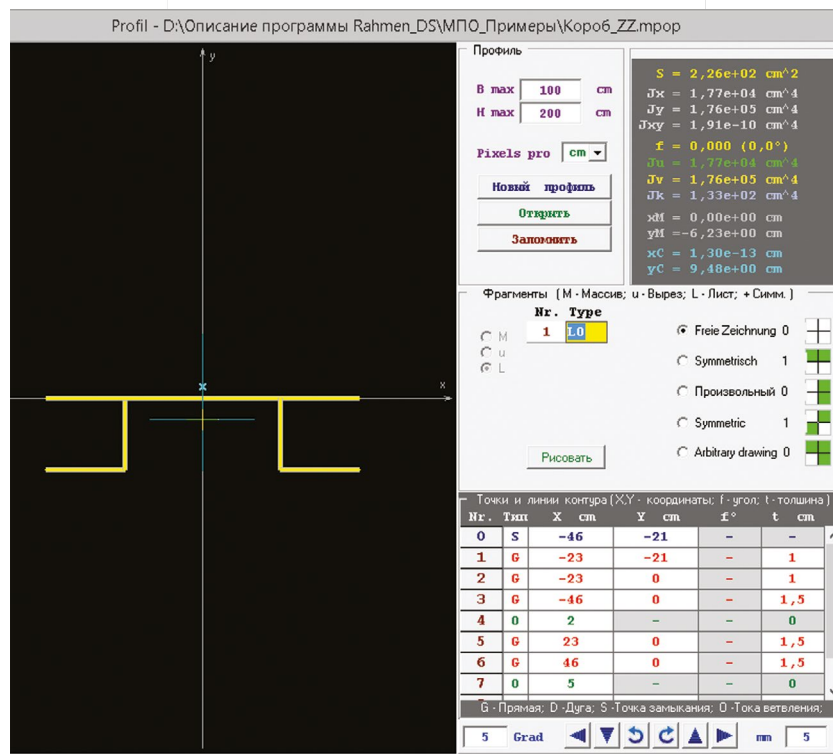


Рис. 2. Результаты расчетов прямолинейного профиля.

Fig. 2. Calculation of a line profile.

исследования некоторых подобных сечений, где за основу брали криволинейные участки, построенные по радиусу (рис. 3–5). Анализируя полученные расчетные значения, можно сделать вывод о целесообразности применения автоматизированного расчета для тонкостенных криволинейных сечений, ввиду сокращения времени на осуществление расчетов и повышения их точности. Несомненное преимущество данной программы связано и с тем, что в процессе расчета можно варьировать непосредственно размерами и формами сложных сечений, тем самым наглядно выбирая и демонстрируя наиболее оптимальное решение при проектировании деталей и узлов различных энергетических и механических установок.

В процессе оптимизации определяются площадь проектируемого сечения, основные инерциальные характеристики тонкостенных криволинейных сечений, такие как моменты инерции, центр тяжести и в нашем случае

наиболее важная — точка центра кручения, положение которой существенным образом влияет на прочностные характеристики сечений. Как видно из рис. 4, программа позволяет определять основные геометрические характеристики сложных тонкостенных криволинейных профилей. Анализируя данные, можно сделать вывод о возможности применения данного алгоритма расчета для сечений с различными сложными тонкостенными криволинейными профилями.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения теоретических предпосылок правильности расчета программы нами проведены экспериментальные исследования определения центра кручения открытого профиля. В качестве экспериментального

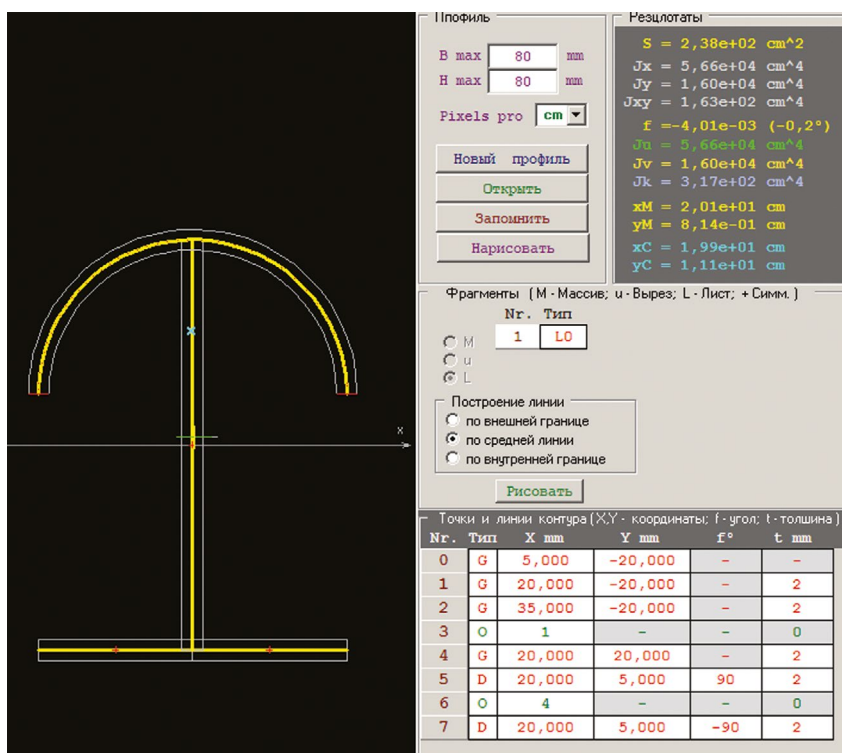


Рис. 3. Результаты расчетов криволинейного профиля (центр кручения расположен на оси симметрии профиля)
 Fig. 3. Calculations of a curved profile (shear center is located on the center line of the profile).

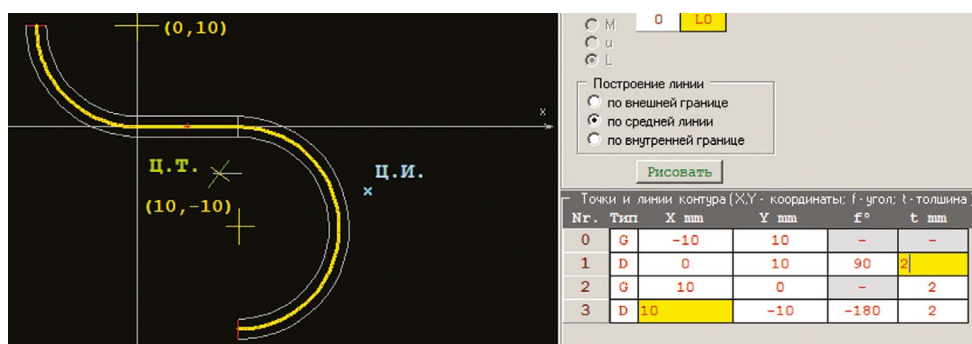


Рис. 4. Результаты расчетов криволинейного профиля (центр кручения расположен вне контура сечения профиля)
 Fig. 4. Calculations of a curved profile (shear center is located outside the cross-section of the profile).

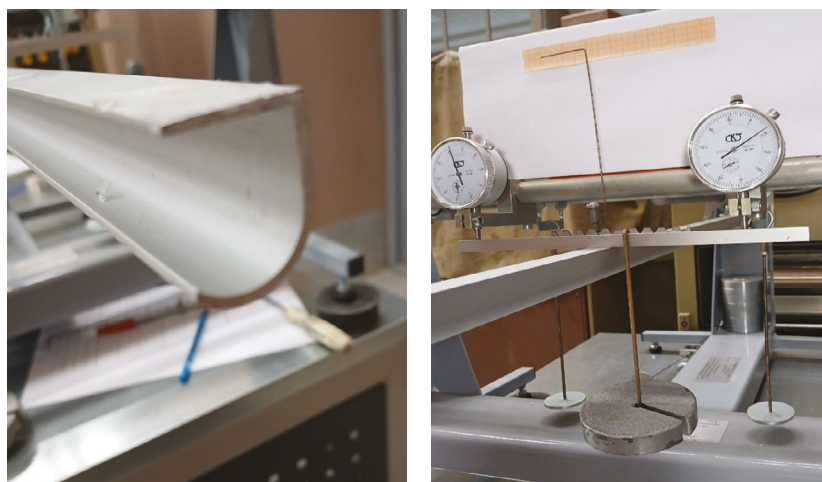


Рис. 5. Внешний вид экспериментальной балки.
Fig. 5. Experimental beam.

профиля была выбрана балка с прямолинейно-криволинейным поперечным сечением, представленная на рис. 5. Размерные характеристики балки полностью соответствуют понятию балок с тонкостенным незамкнутым сечением, а именно использовались алюминиевые балки длиной 90 см и 50 см с толщиной стенки 2 мм с габаритами сечения 20 на 25 мм.

На прямолинейной стороне балки (рис. 6) прикреплен гребенка с делениями в 10 мм, с помощью которой контролируют положение гиревого подвеса. На расстоянии 20 см по обеим сторонам гребенки устанавливаются индикаторы, которые фиксируют прогиб конца балки при установленной плоскости нагружения. При перемещении подвеса с грузом слева направо измеряются деформации по обоим индикаторам, после чего вычисляется разность приращений левого и правого. По мере приближения к центру кручения разность приращений уменьшается, и положение самой точки кручения будет там, где приращения изменяют свой знак. При этом показания одного из индикаторов, укрепленных на гребенке, увеличиваются, а другого уменьшаются. Особенностью

лабораторной установки является использование в качестве измерительного инструмента обычной линейки, закрепленной вблизи направляющей, по которой представляется подвес с грузом.

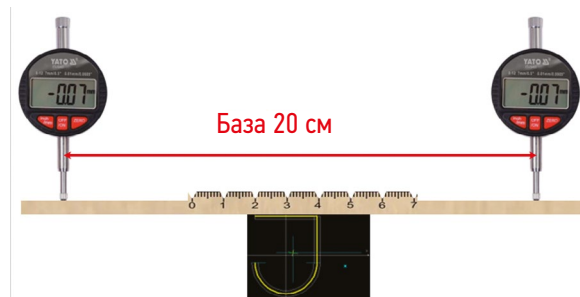
Следует обратить внимание на то, что расстояния до центра кручения аналитически и экспериментально определяются от разных точек начала отсчета: аналитически — от срединной линии профиля, экспериментально — слева от горизонтальной грани профиля.

Порядок проведения опытов:

1. Закрепить струбциной гребенку на любой удобной поверхности профиля, таким образом, чтобы будущая силовая линия нагружения прошла через крайнюю точку профиля.
2. Установить гиревой подвес в крайнюю левую точку гребенки (точка на линейке на цифре 0); снять показания индикаторов при отсутствии внешних сил и занести их в таблицу.
3. Уложить груз массой 100 или 150 г на гиревой поднос; снять показания обоих индикаторов и занести их в таблицу.



Рис. 6. Лабораторная установка для определения центра кручения.
Fig. 6. Laboratory setup used to determine the shear center.



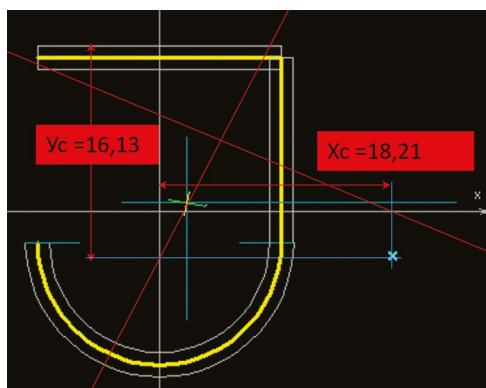
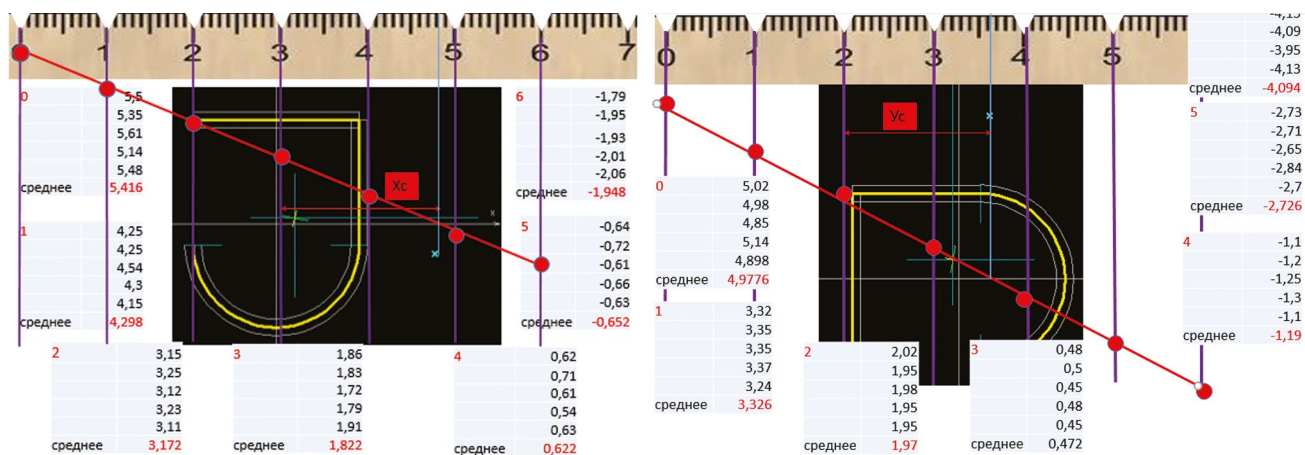


Рис. 7. Графическое определение центра кручения в разных плоскостях.
 Fig. 7. Graphic shear center calculation in different planes.

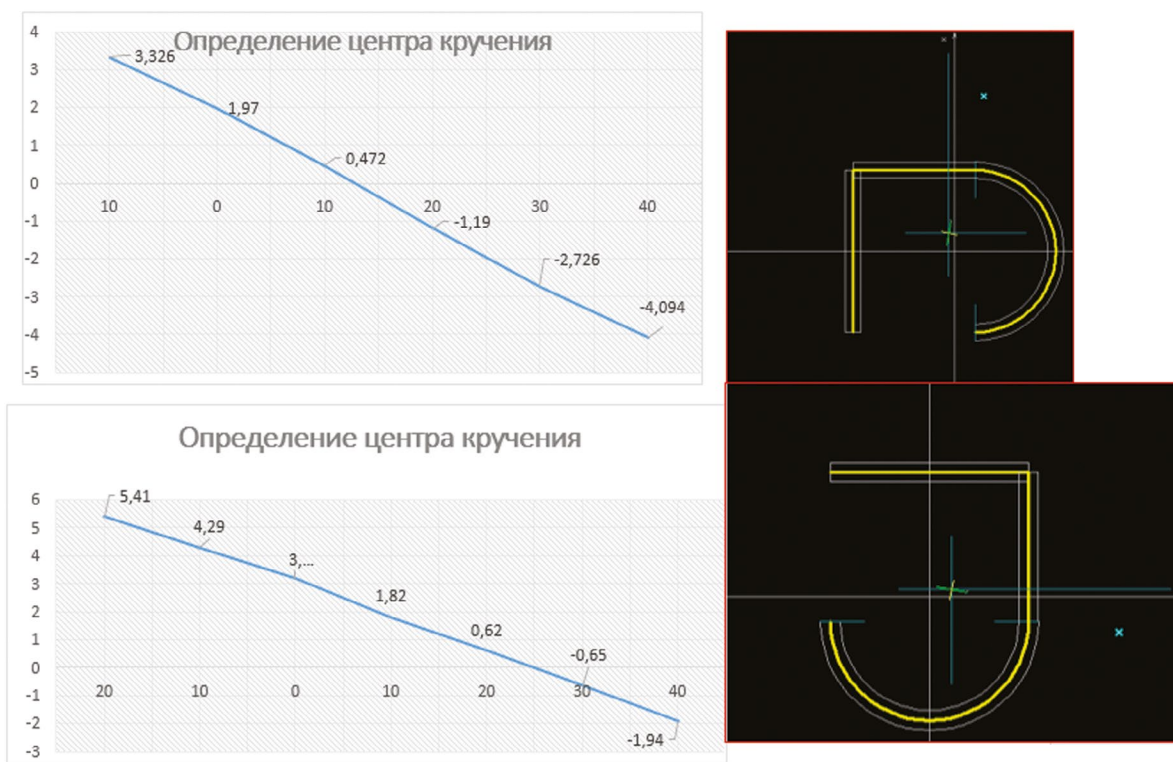


Рис. 8. Графическое определение центра кручения в разных плоскостях.
 Fig. 8. Graphic shear center calculation in different planes.

4. Снять груз и переместить подвес каретку на 10 мм в сторону предполагаемого нахождения центра изгиба (вправо); снять показания индикаторов при ненагруженном состоянии лабораторной установки и занести их в таблицу.
5. Повторить пункты 3 и 4 несколько раз. Построить график зависимости разности приращений от точек прохождения силовой плоскости нагружения. Определить координату силовой плоскости, проходящей через центр кручения (точка пересечения нулевой линии).
6. Закрепить струбциной гребенку на любой другой поверхности профиля, таким образом, чтобы будущая силовая линия нагружения прошла через крайнюю точку профиля.
7. Повторить пункты 2, 3, 4, 5.
8. Построить совместный график, наложенный на расчетное сечение по электронной программе, проверить точность теоретического расчета координат центра кручения и опытных значений (рис. 7).

Для наглядного изучения деформации балки тонкостенного профиля был проведен отдельный эксперимент. С этой целью на поверхность балки был закреплен «маячок» в виде тонкого Г-образного очертания. Подвес с грузом устанавливался на гребенку в том месте, где были получены точки пересечения графиков (рис. 8) с нейтральной осью. Представленный фотоматериал наглядно свидетельствует об отсутствии кручения балки, а прогиб происходит в вертикальной плоскости, то есть с отсутствием малейшего намека на кручение (рис. 9).

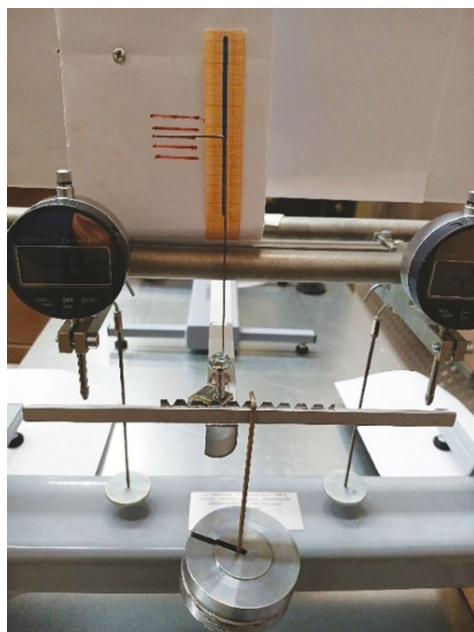


Рис. 9. Наглядное изучение центра кручения.
Fig. 9. Observation of the shear center.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам работы, проведенной сотрудниками кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», можно сделать следующие выводы:

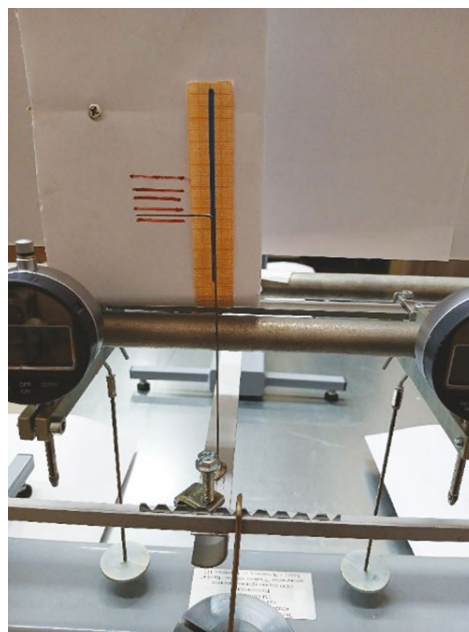
Разработан алгоритм построения поперечных сечений различного профиля, позволяющий рассчитать основные геометрические характеристики тонкостенных криволинейных профилей, такие как площадь и центр тяжести сечения, полярный, центробежный и осевые моменты инерции, центр кручения.

Изготовлена лабораторная установка для определения центра кручения тонкостенных профилей с методикой экспериментальных исследований.

Проведены лабораторные исследования по определению центра кручения для балки с незамкнутым тонкостенным профилем прямолинейно-криволинейного очертания.

Экспериментально подтверждено совпадение теоретических расчетов определения центра кручения с опытными данными. При пятикратной повторности исследований на каждой точке нагружения разница теоретических данных с экспериментом не превышала $\pm 0,3\%$.

Таким образом, разработанная электронная программа для расчетов основных геометрических параметров поперечных сечений балок может быть использована как в учебных целях, так и для дальнейших научных исследований при конструировании и совершенствовании различных элементов машин и технологического оборудования.



ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: А.Н. Андреев — разработка методики лабораторных исследований, изготовление экспериментальной установки; Д.А. Николаев — написание программы расчета жесткостных характеристик поперечных сечений.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: A.N. Andreev, development of laboratory research methods, manufacture of an experimental facility; D.A. Nikolaev, writing a program for calculating the stiffness characteristics of cross-sections.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.Н., Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Алгоритм и программа определения положения центра кручения тонкостенного профиля. В кн.: Тезисы докладов конференции «Памяти академиков-кораблестроителей». Санкт-Петербург: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2023. С. 75–76.
2. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Квазиодномерные модели для анализа параметров вибрации судового корпуса на ранних стадиях его проектирования // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2–1. С. 45–51. EDN: WADFQY
3. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Совместная вибрация судового корпуса и его конструктивных модулей с малым рай-

оном сопряжения // Морской вестник. 2022. № 1. С. 17–19. EDN: GVHBYK

4. Челпанова Н.Г., Кадисов Г.М. Расчет тонкостенных стержней открытого профиля. Методические указания к выполнению расчетно-графических работ. Омск: СибАДИ, 2008.

5. Александров В.Л., Матлах А.П., Поляков В.И. Борьба с вибрацией на судах. Санкт-Петербург: Мор Вест, 2005. 421 с. EDN: QNSOHV

6. Свидетельство о регистрации № 2023680773/04.10.23. Бабанин Н.В., Мелконян А.Л., Титова Ю.Ф. Программа для расчета вибрации квазиодномерной конструкции.

REFERENCES

1. Andreev AN, Melkonian AL, Nikolaev DA. Algorithm and program for determining the position of the torsion center of a thin-walled profile. In: *Theses of reports of the conference "In memory of academicians-shipbuilders"*. Saint Petersburg: Federal State Unitary Enterprise "Krylov state research center"; 2023. P. 75–76. (In Russ.)
2. Melkonian AL, Nikolaev DA. Quasi-one-dimensional models for the analysis of parameters of vibration of the ship hull at early stages of his design. *Marine intelligent technologies*. 2019;(2–1):45–51. EDN: WADFQY
3. Melkonian AL, Nikolaev DA. Joint vibration of a ship hull and its structural modules with a small interface area. *Marine Bulletin*. 2022;(1):17–19. EDN: GVHBYK (In Russ.)

4. Chelpanova NG, Kadisov GM. *Calculation of thin-walled rods of open profile. Methodical instructions for realization of calculation-graphic works*. Omsk: SibADI; 2008. (In Russ.)

5. Alexandrov VL, Matlakh AP, Polyakov VI. *Combating vibration on ships*. Saint Petersburg: Mor West; 2005. 421 p. EDN: QNSOHV (In Russ.)

6. Registration certificate N 2023680773/04.10.23. Babanin NV, Melkonian AL, Titova YuF. *Program for calculation of vibration of quasi one-dimensional structure*. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

***Александр Николаевич Андреев**, канд. техн. наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3; ORCID: 0000-0003-3775-4482; eLibrary SPIN: 2134-5414; e-mail: aan300@list.ru

Дмитрий Александрович Николаев, канд. техн. наук; e-mail: d.nikolaev@d-nik.de

AUTHORS' INFO

***Alexander N. Andreev**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor at the Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; ORCID: 0000-0003-3775-4482; eLibrary SPIN: 2134-5414; e-mail: aan300@list.ru

Dmitriy A. Nikolaev, Cand. Sci. (Engineering); e-mail: d.nikolaev@d-nik.de

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author