

В.В. НАДОЛЬСКИЙ¹, В.И. ПОДЫМАКО¹

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СОВМЕЩНОМ ДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНЫХ И СДВИГОВЫХ УСИЛИЙ

***Аннотация.** Стальные балки с гибкими стенками привлекают своей эффективностью при работе на изгиб. Для таких балок весьма актуальным становится вопрос обеспечения местной устойчивости. Расчетные формулы в большинстве случаев сложны и имеют ограниченную область применения. В связи с этим особое место приобретают расчеты на основе КЭ моделей, которые позволяют более универсально учесть всю специфику проектируемого элемента. В статье рассматривается расчет устойчивости стенки балки при совместном действии локальных и сдвиговых усилий посредством конечно-элементного моделирования. Созданы численные модели и произведен сравнительный анализ с экспериментальными результатами. Представлено описание принципов построения КЭ моделей (размер сетки КЭ, модель материалов и т.д.), которые необходимо соблюдать при оценке несущей способности балок с гибкими стенками. Анализ чувствительности КЭ модели к входным параметрам выявил наиболее важные параметры (предел текучести стали, толщина стенки), неопределенность которых необходимо учитывать при создании КЭ моделей. Сходимость результатов позволяет использовать метод конечных элементов при проектировании стальных балок для качественной и количественной оценке несущей способности. Однако требуется дальнейшая разработка унифицированных принципов построения КЭ моделей и их верификация на большем количестве экспериментальных данных, а также определение частных коэффициентов для учета изменчивости и неопределенности получаемых результатов с учетом регламентированных параметров надежности.*

***Ключевые слова:** местная устойчивость стенки, моделирование, метод конечных элементов, несовершенство, дискретизация, критическая сила, численная модель.*

V.V. NADOLSKI¹, V.I. PODYMAKO¹

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

THE EVALUATION OF ULTIMATE RESISTANCE OF STEEL BEAMS TO COMBINED SHEAR AND PATCH LOADING BY FINITE ELEMENT METHOD

***Abstract.** Thin-web steel girders attract with their efficiency in bending work. For such girders, the issue of ensuring local stability becomes very relevant. Calculation formulas in most cases are complex and have a limited scope of application. While the calculations based on FE models make it possible to more universally consider all the specifics of the designed element. The article deals with the calculation of the stability of the web girder under the combination of patch and shear loading by finite element modelling. Numerical models have been created and a comparative analysis with experimental results has been carried out. A description of the principles for constructing FE models (mesh size, material model, etc.), which must be observed when assessing the resistance and behaviour of beams with thin web, is presented. Sensitivity analysis of the FE model to the input parameters revealed the most important parameters (yield strength of steel, web thickness), the uncertainty of which must be taken into account when creating FE models. The convergence of the results allows the use of the finite element method in the design of steel beams for a qualitative and quantitative assessment of the resistance. However, further development of unified principles for creating FE models and their verification on a larger amount of experimental data is required, as well as the determination of partial*

factors to take into account the variability and uncertainty of the results obtained, taking into account the regulated reliability parameters.

Keywords: stability of the web panel, modelling, finite element method, imperfections, discretization, critical force, numerical model.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roberts T. M., Shahabian F. Combined Shear and Patch Loading of Plate Girders. *Journal of Structural Engineering*, ASCE. 2000. Vol. 126. No. 3. Pp. 316-321.
2. Roberts T. M., Shahabian F. Ultimate resistance of slender web panels to combined bending shear and patch loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2001. Vol. 57 No. 7. Pp. 779-790. ISSN 0143-974X.
3. Braun B. Stability of steel plates under combined loading. Mitteilungen: Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart, 2010. 226 p.
4. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements. EN1993-1-5. CEN (European Committee for Standardization). Brussels, Belgium: CEN. 2006.
5. Johansson B., Maquoi R., Sedlacek G. New design rules for plated structures in Eurocode 3. *Journal of Constructional Steel Research*. 2001. Vol. 57. Pp. 279–311.
6. Надольский В. В., Мартынов Ю.С. Оценка ошибок моделей сопротивления сдвигу, принятых в EN 1993-1-5 и СНиП II-23 // Вестник МГСУ. 2013. № 5. С. 7–20. doi: 10.22227/1997-0935.2013.5.7-20
7. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. № 6 (16). С. 676-687.
8. Сидоров В. Н., Бадина Е. С. Нелокальные модели демпфирования в динамических расчетах конструкций из композитных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 66-70.
9. Перельмутер А. В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13. Issue 3. Pp. 86-102.
10. Крылов А. С. Экспериментальная оценка точности расчетов стальных балок при различных граничных условиях // Строительство и реконструкция. 2019. № 1(81). С. 48-55.
11. Nadolski V. Á., Rózsás M., Sýkora. Calibrating partial factors - methodology, input data and case study of steel structures. *Periodica Polytechnica: Civil Engineering*. 2019. Vol. 63. No. 1. Pp. 222-242.
12. Мартынов Ю. С., Надольский В. В., Верева Ф. А. Стеновые панели на основе кассетных профилей. Часть 1. Теоретические исследования // Строительство и реконструкция. 2019. № 4(84). С. 26-37.
13. Кузнецов Д. Н., Емельянов Д. И., Павленко Т. М. Силовая сэндвич-панель поэлементной сборки // Строительная механика и конструкции. 2020. № 1(24). С. 70-84.
14. Yun X, Gardner L. Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. No. 133. Pp. 36–46.
15. Конин Д.В., Одесский П.Д., Олуромби А.Р. Влияние диаграммы "б-е" на несущую способность при сжатии труб из стали высокой прочности // Строительство и реконструкция. 2017. № 5(73). С. 15-20.
16. Ведяков И. И., Конин Д. В., Олуромби А. Р., Нахвальнов П. В. Учет пластических деформаций при расчете фланцевых соединений // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 9-16.
17. BSK. Boverkets Handbok om Stålkonstruktioner, BSK 07, November 2007.
18. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Поправками, с Изменениями N 1, 2). М.: Стандартинформ, 2017.
19. СП 5.04.01-2021. Стальные конструкции. Минск : Минстройархитектуры, 2021.
20. Pavlovčić L., Detzel A., Kuhlmann U., Beg D. Shear resistance of longitudinally stiffened panels. Part 1: Tests and numerical analysis of imperfections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63. No.3. Pp. 337-350.
21. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading. *Thin-Walled Structures*. 2012. Vol. 53. Pp: 15–25.
22. Ruff D.C., Schulz U. Der Einfluss von Imperfektionen auf das Tragverhalten von Platten. *Stahlbau*. 1999. Vol. 68. No.10. Pp. 829–834.
23. Серпик И. Н., Школяренко Р. О. Расчет систем тонкостенных стержней корытообразного профиля с учетом стесненного кручения // Строительство и реконструкция. 2018. № 4(78). С. 31-41.
24. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 176. Pp. 106 - 138. ISSN 0143-974X.
25. Перельмутер А. В. Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции // Вестник МГСУ. 2021. № 12(16). С. 1559-1566.
26. Тур В.В., Тур А.В., Лизогуб А.А. Проверка живучести конструктивных систем из сборного железобетона по методу энергетического баланса // Вестник МГСУ. 2021. № 8(16). С. 1015-1033.

REFERENCES

1. Roberts T.M., Shahabian F. Combined Shear and Patch Loading of Plate Girders. *Journal of Structural Engineering*, ASCE. 2000. Vol. 126. No. 3. Pp. 316-321.
2. Roberts T.M., Shahabian F. Ultimate resistance of slender web panels to combined bending shear and patch loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2001. Vol. 57 No. 7. Pp. 779-790. ISSN 0143-974X.
3. Braun B. Stability of steel plates under combined loading. Mitteilungen: Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart, 2010. 226 p.
4. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements. EN1993-1-5. CEN (European Committee for Standardization). Brussels, Belgium: CEN. 2006.
5. Johansson B., Maquoi R., Sedlacek G. New design rules for plated structures in Eurocode 3. *Journal of Constructional Steel Research*. 2001. Vol. 57. Pp. 279–311.
6. Nadol'skij V.V., Martynov Y.S. Ocenka oshibok modelej soprotivleniya sdvigu, prinyatyh v EN 1993-1-5 i SNiP II-23. *Vestnik MGSU*. 2013. No. 5. Pp. 7–20. doi: 10.22227/1997-0935.2013.5.7-20 (rus)
7. Saiyan S.G., Paushkin A.G. Chislennoe parametricheskoe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dvutavrovyyh balok s razlichnymi tipami gofirovannyh stenok. *Vestnik MGSU*. 2021. Vol. 16. No. 6. Pp. 676-687. (rus)
8. Sidorov V.N., Bad'ina E.S. Nelokal'nye modeli dempfirovaniya v dinamicheskikh raschetah konstrukcij iz kompozitnyh materialov. *Industrial and Civil Engineering*. 2021. No 9. Pp. 66-70. (rus)
9. Perel'muter A.V., Tur V.V. Gotovy li my perejti k nelinejnomu analizu pri proektirovanii? *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13. Issue 3. Pp. 86-102. (rus)
10. Krylov A.S. Eksperimental'naya ocenka tochnosti raschetov stal'nyh balok pri razlichnyh granichnyh usloviyah. *Building and Reconstruction*. 2019. Vol. 81. No. 1. Pp. 48-55. (rus)
11. Nadolski V.Á., Rózsás M., Sýkora. Calibrating partial factors - methodology, input data and case study of steel structures. *Periodica Polytechnica: Civil Engineering*. 2019. Vol. 63. No. 1. Pp. 222-242.
12. Martynov Y.S., Nadol'skij V.V., Verevka F.A. Stenovye paneli na osnove kassetnyh profilej. Chast' 1. Teoreticheskie issledovaniya. *Building and Reconstruction*. 2019. Vol. 84. No. 4. Pp. 26-37. (rus)
13. Kuznecov D. N., Emel'yanov D. I., Pavlenko T. M. Silovaya sendvich-panel' poelementnoj sborki. *Structural mechanics and structures*. 2020. Vol. 24. No. 1. Pp. 70-84. (rus)
14. Yun X, Gardner L. Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. No. 133. Pp. 36–46.
15. Konin D.V., Odesskij P.D., Olurombi A.R. Vliyanie diagrammy "Б-Е" na nesushchuyu sposobnost' pri szhatii trub iz stali vysokoj prochnosti. *Building and Reconstruction*. 2017. Vol. 73. No. 5. Pp. 15-20. (rus)
16. Vedyakov I.I., Konin D.V., Olurombi A.R., Nahval'nov P.V. Uchet plasticheskikh deformacij pri raschete flancevyyh soedinenij. *Industrial and Civil Engineering*. 2021. No. 10. Pp. 9-16. (rus)
17. BSK. Boverkets Handbok om Stålkonstruktioner, BSK 07, November 2007.
18. SP 16.13330.2017 Stal'nye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNiP II-23-81* (s Popravkami, s Izmeneniyami N 1, 2). M.: Standartinform, 2017. (rus)
19. SP 5.04.01-2021 Stal'nye konstrukcii. Minsk : Minstrojarhitektury, 2021 (rus)
20. Pavlovčič L., Detzel A., Kuhlmann U., Beg D. Shear resistance of longitudinally stiffened panels. Part 1: Tests and numerical analysis of imperfections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63. No.3. Pp. 337-350.
21. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading. *Thin-Walled Structures*. 2012. Vol. 53. Pp. 15–25.
22. Ruff D.C., Schulz U. Der Einfluss von Imperfektionen auf das Tragverhalten von Platten. *Stahlbau*. 1999. Vol. 68. No.10. Pp: 829–834.
23. Serpik I.N., Shkolyarenko R.O. Raschet sistem tonkostennyh sterzhnej korytoobraznogo profilya s uchetom stesnennogo krucheniya *Building and Reconstruction*. 2018. Vol. 78. No. 4. Pp. 31-41. (rus)
24. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 176. Pp. 106-138. ISSN 0143-974X.
25. Perel'muter A.V. Ispol'zovanie kriteriya otpornosti dlya ocenki predel'nogo sostoyaniya konstrukcii. *Vestnik MGSU*. 2021. Vol. 16. No. 12. Pp. 1559-1566. (rus)
26. Tur V.V., Tur A.V., Lizogub A.A. Proverka zhivuchesti konstruktivnyh sistem iz sbornogo zhelezobetona po metodu energeticheskogo balansa. *Vestnik MGSU*. 2021. Vol. 16. No. 8. Pp. 1015-1033. (rus)

Информация об авторах:

Надольский Виталий Валерьевич

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительные конструкции.

E-mail: nadolskiv@mail.ru

Подымако Владислав Игоревич

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
магистрант кафедры строительные конструкции.

E-mail: vipodymako@gmail.com

Information about authors:

Nadolski Vitali V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
candidate of technical science (PhD), docent, associated professor of the department of Building constructions.

E-mail: nadolskivv@mail.ru

Podymako Vladislav I.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
undergraduate of the department of Building constructions.

E-mail: vipodymako@gmail.com