

С.Ю. КАЛАШНИКОВ^{1,2}, Е.В. ГУРОВА¹, Н.Г. БАНДУРИН¹¹Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия²Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, г. Москва, Россия

ПРОДОЛЬНОЕ СЖАТИЕ СТЕРЖНЯ С НАЧАЛЬНОЙ ПОГИБЬЮ, ПРИОБРЕТАЮЩЕГО НАВЕДЕННУЮ АНИЗОТРОПИЮ

Аннотация. Рассматривается центрально сжатый гибкий прямолинейный стальной стержень. Вследствие имеющегося начального несовершенства в виде погиби стержень работает как сжато-изогнутый. Неоднородность напряженного состояния от изгиба приводит к стеснению деформаций, вызывающих изменение упругих характеристик материала. Для получения уравнения стержня в отклоненном состоянии используется предложенная ранее авторами инкрементальная теория нелинейного деформирования тел в неоднородных полях напряжений с индуцированной анизотропией свойств. Неоднородность поля напряжений вызывает переменность упругих характеристик материала, приводящих вследствие индуцированной инкрементальной криволинейной анизотропии к изменению расчетных параметров конструкции. Решение строится на численной реализации уравнения изогнутой оси с применением метода переменного параметра упругости. Анализируется рост прогибов на ступенях последовательного нагружения возрастающей силой. Рассмотрены различные варианты начальных кривизн, в том числе и исчезающее малой. Независимо от величины начального прогиба установлено заметное увеличение сжимающей силы, отвечающей значительному нарастанию прогибов по сравнению с бифуркационным подходом.

Ключевые слова: индуцированная анизотропия, продольный изгиб, градиент напряжений, инкрементальные соотношения, начальная погибь.

S.Y. KALASHNIKOV^{1,2}, E.V. GUROVA¹, N.G. BANDURIN¹¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia²Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia

LONGITUDINAL COMPRESSION OF A ROD WITH AN INITIAL LOSS ACQUIRING INDUCED ANISOTROPY

Abstract. A centrally compressed flexible rectilinear steel rod is considered. Due to the existing initial imperfection in the form of a perish, the rod works as a compressed-curved one. The inhomogeneity of the stress state from bending leads to the constraint of deformations that cause a change in the elastic characteristics of the material. To obtain the equation of the rod in the deflected state, the incremental theory of nonlinear deformation of bodies in inhomogeneous stress fields with induced anisotropy of properties proposed earlier by the authors is used. The inhomogeneity of the stress field causes the variability of the elastic characteristics of the material, which, due to the induced incremental curvilinear anisotropy, lead to a change in the design parameters of the structure. The solution is based on the numerical implementation of the curved axis equation using the method of variable elasticity parameter. The growth of deflections at the stages of sequential loading with increasing force is analyzed. Various variants of initial curvatures, including vanishing small ones, are considered. Regardless of the magnitude of the initial deflection, a noticeable increase in the compressive force was found, corresponding to a significant increase in deflections compared to the bifurcation approach.

Keywords: induced anisotropy, longitudinal bending, stress gradient, incremental ratios, initial loss.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xiao Y., Zhang Z., Wang J. Granular hyperelasticity with inherent and stress-induced anisotropy. *Acta Geotech.* 15, 671–680 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00768-z>
2. Бусько В.Н., Осипов А.А. Применение магнитошумового метода для контроля механической анизотропии ферромагнитных материалов // *Приборы и методы измерений.* 2019. Т. 10. № 3. С. 281–292. doi:10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292
3. Попович А.А., Суфияров В.Ш., Борисов Е.В., Полозов И.А., Масайло Д.В., Григорьев А.В. Анизотропия механических свойств изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления порошковых материалов // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2016. №3. С.4-11. doi:dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-4-11.
4. Ельцов Р.И. Разработка технологического процесса изготовления сварных конструкций // *Строительные материалы и изделия.* 2021. Том 4. № 5. С.35-44.
5. Одесский П.Д., Гурьева Е.С. Влияние пластической деформации на анизотропию механических свойств стальных листов большой толщины для строительных конструкций // *Строительная механика и расчет сооружений.* 1991. № 1. С.70-77.
6. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Волкова Л.В. Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба. *Сталь.* 2016. № 10. С. 75-79.
7. Finelli A., Labanti M. Analysis of the influence of the anisotropy induced by cold rolling on duplex and super-austenitic stainless steels // *Frattura ed Integrità Strutturale.* 2010. Iss 13. P. 24-30.
8. Loginov Y.N., Puzanov M.P. Influence of properties anisotropy on stress-deformed state at rolling stripes from electrical steel // *Chernye Metally.* 2018. Iss. 10. P. 22-27.
9. Устинов К.Б.. О наведенной анизотропии механических свойств эластомеров // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела.* 2019. №5. С.27-36. doi:10.1134/S0572329919050167
10. Experimental analysis of the effect of carbon nanoparticles with different geometry on the appearance of anisotropy of mechanical properties in elastomeric composites / К.А. Mokhireva, А. Svistkov, Vladislav N. Solod'ko, L. Komar, K. Stöckelhuber // *Polymer testing.* 2017. Т. 59. С. 46-54. doi:10.1016/j.polymertesting.2017.01.007
11. Шадрин В.В., Мохирева К.А., Комар Л.А. Анизотропия механических свойств наполненных вулканизаторов под воздействием внешней нагрузки. – *Вестник Пермского федерального исследовательского центра.* 2017. № 1. С. 93-98.
12. Корнеев С.А., Корнеев В.С., Романюк Д.А. Математическое моделирование эффекта наведенной деформационной анизотропии резинокордного упругого элемента плоской муфты. – *Омский научный вестник.* 2017. № 3(153). С. 10-15.
13. Комар Л.А., Мохирева К.А., Морозов И.А.. Исследование появления анизотропных свойств полимерных нанокомпозитов в результате предварительного деформирования в условиях двухосного нагружения.- *Вестник Пермского федерального исследовательского центра.* 2017. № 2. С. 61-66.
14. Калашников С.Ю. Экспериментальная проверка модели деформирования материала в условиях неоднородного напряжённого состояния: монография. ВолгГТУ. Волгоград, 2017. 80 с.
15. Колчунов В.И., Федоров В.С. Понятийная иерархия моделей в теории сопротивления строительных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство.* 2020. № 8. С. 16-23. doi:10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.
16. Петров В.В. Инкрементальные уравнения механики деформируемого тела в полных функциях. *Вестник отделения строительных наук. Вып.14: в 2 т. Т.1. РААСН Иван. гос. архит.-стр. ун-т. М. Иваново, 2010. С. 159-166.*
17. Зиновьев А.С. Напряженно-деформированное состояние системы "плита - слой основания" на базе инкрементальной модели деформирования // *Вестник Саратовского государственного технического университета.* 2009. Вып. 1(37). С. 27-33.
18. Модель деформирования железобетона в приращениях и расчет балок-стенок и изгибаемых плит с трещинами : монография / Н.И. Карпенко [и др.]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования Петрозав. гос. ун-т. - Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2013. 153 с.
19. Петров В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика. М.: Инфра. Инженерия, 2014. 480 с.
20. Купавцев В.В. Базисные функции метода двусторонних оценок в задачах устойчивости упругих неоднородно сжатых стержней. *Вестник МГСУ.* № 6. С. 63-70.
21. Инкрементальная модель для исследования устойчивости высотного сооружения на неоднородном основании / Иноземцев В.К., Синева Н.Ф., Иноземцева О.В. // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* 2008. №2. С. 41-46.
22. About the Distortion Model of Operational Compressed-Bent Bars with Induced Anisotropy / С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова, Р.Х. Курамшин, Б. Языев // *International Scientific Conference on Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies (Moscow 26 November 2021)* / eds.: А. Ginzburg, G. Kashevarova. - Springer, Cham, 2022. Vol. 231. P. 95-102. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7_10.

23. Калашников С.Ю., Гурова Е.В., Шведов Е.Г. Применение метода Бубнова - Галеркина для анализа деформирования сжато-изогнутого стержня с индуцированной анизотропией // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 1 (86). С. 132-144.
24. Бандурин Н.Г., Калашников С.Ю. Метод и пакет программ для численного решения систем существенно нелинейных интегро-дифференциально-алгебраических уравнений (корректные по Адамару двумерные и трехмерные краевые задачи) // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 5. С. 3-11.
25. Бандурин Н.Г., Калашников С.Ю. Численный метод и программа для определения критического состояния упругого стержня переменной жесткости в общем случае закрепления его концов // Строительство и реконструкция. 2015. № 2. С. 4-11.
26. Бандурин Н.Г., Калашников С.Ю. Расчёт сжатых стоек в составе простых плоских рам с помощью компьютерной программы и сравнение результатов с расчётами по СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» // Вестник Волгоградского гос. архит.-строит. ун-та. Сер. Строительство и архитектура. 2016. № 46 (65). С. 48-57.
27. Вольмир А.С. Устойчивость упругих систем. М.: Физматгиз, 1963. 880 с.

REFERENCES

1. Xiao Y., Zhang Z., Wang J. Granular hyperelasticity with inherent and stress-induced anisotropy. *Acta Geotech.* 15, 671–680 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00768-z>
2. Bus'ko V.N., Osipov A.A. Primenenie magnitoshumovogo metoda dlya kontrolya mekhanicheskoy anizotropii ferromagnitnykh materialov // *Pribory i metody izmerenij.* 2019. T. 10. No. 3. Pp. 281–292. doi:10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292
3. Popovich A.A., Sufiyarov V.SH., Borisov E.V., Polozov I.A., Masajlo D.V., Grigor'ev A.V. Anizotropiya mekhanicheskikh svojstv izdelij, izgotovlennykh metodom selektivnogo lazernogo plavlenniya poroshkovykh materialov // *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funkcional'nye pokrytiya.* 2016. No. 3. Pp. 4-11. doi:dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-4-11.
4. El'cov R.I. Razrabotka tekhnologicheskogo processa izgotovleniya svarnykh konstrukcij // *Stroitel'nye materialy i izdeliya.* 2021. Tom 4. No. 5. Pp. 35-44.
5. Odesskij P.D., Gur'eva E.S. Vliyanie plasticheskoy deformacii na anizotropiyu mekhanicheskikh svojstv stal'nykh listov bol'shoj tolshchiny dlya stroitel'nykh konstrukcij // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij.* 1991. No.1. Pp. 70-77.
6. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Vliyanie anizotropii mekhanicheskikh svojstv tonkolistovogo stal'nogo prokata na informativnye parametry voln Lemba. *Stal'.* 2016. No. 10. Pp. 75-79.
7. Finelli A., Labanti M. Analysis of the influence of the anisotropy induced by cold rolling on duplex and super-austenitic stainless steels // *Frattura ed Integrità Strutturale.* 2010. Iss 13. Pp. 24-30.
8. Loginov Y.N., Puzanov M.P. Influence of properties anisotropy on stress-deformed state at rolling stripes from electrical steel // *Chernye Metally.* 2018. Iss. 10. Pp.22-27.
9. Ustinov K.B. O navedennoj anizotropii mekhanicheskikh svojstv elastomerov // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela.* 2019. No. 5. Pp. 27-36. doi:10.1134/S0572329919050167
10. Experimental analysis of the effect of carbon nanoparticles with different geometry on the appearance of anisotropy of mechanical properties in elastomeric composites / K.A. Mokhireva, A. Svistkov, Vladislav N. Solod'ko, L. Komar, K. Stöckelhuber // *Polymer testing.* 2017. T. 59. Pp. 46-54. doi:10.1016/j.polymertesting.2017.01.007
11. SHadrin V.V., Mohireva K.A., Komar L.A. Anizotropiya mekhanicheskikh svojstv napolnennykh vulkanizatorov pod vozdejstviem vneshnej nagruzki. – *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo centra.* 2017. No. 1. Pp. 93-98.
12. Korneev S.A., Korneev V.S., Romanyuk D.A. Matematicheskoe modelirovanie efekta navedennoj deformacionnoj anizotropii rezinokordnogo uprugogo elementa ploskoj mufty. – *Omskij nauchnyj vestnik.* 2017. No. 3(153). Pp. 10-15.
13. Komar L.A., Mohireva K.A., Morozov I.A. Issledovanie poyavleniya anizotropnykh svojstv polimernykh nanokompozitov v rezul'tate predvaritel'nogo deformirovaniya v usloviyah dvuhosnogo nagruzheniya.- *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo centra.* 2017. No. 2. Pp.61-66.
14. Kalashnikov S.YU. Eksperimental'naya proverka modeli deformirovaniya materiala v usloviyah neodnorodnogo napryazhyonnogo sostoyaniya: monografiya. VolgGTU. Volgograd, 2017. 80 p.
15. Kolchunov V.I., Fedorov V.S. Ponyatijnaya ierarhiya modelej v teorii soprotivleniya stroitel'nykh konstrukcij // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo.* 2020. No. 8. Pp. 16-23. doi:10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.
16. Petrov V.V. Inkremental'nye uravneniya mekhaniki deformiruемого tela v polnykh funkciyah. *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk. Vyp.14: v 2 t. T.1. RAASN Ivan. gos. arhit.-str. un-t. M. Ivanovo,* 2010. Pp. 159-166.
17. Zinov'ev A.S. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sistemy "plita - sloj osnovaniya" na baze inkremental'noj modeli deformirovaniya // *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2009. Vyp. 1(37). Pp. 27-33.
18. Model' deformirovaniya zhelezobetona v prirashcheniyah i raschet balok-stenok i izgibaemykh plit s treshchinami : monografiya / N.I. Karpenko [i dr.]; M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, Feder. gos. byudzhet. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya Petrozav. gos. un-t. - Petrozavodsk : Izd-vo PetrGU, 2013. 153 p.

19. Petrov V.V. Nelinejnaya inkremental'naya stroitel'naya mekhanika. M.: Infra – Inzheneriya, 2014. 480 p.
20. Kupavcev V.V. Bазисnye funkцii metoda dvustoronnih ocenok v zadachah ustojchivosti uprugih neodnorodno szhatyh sterzhnej. Vestnik MGSU. No. 6. Pp. 63-70.
21. Inkremental'naya model' dlya issledovaniya ustojchivosti vysotnogo sooruzheniya na neodnorodnom osnovanii / Inozemcev V.K., Sineva N.F., Inozemceva O.V. // Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2008. No. 2. Pp. 41-46.
22. About the Distortion Model of Operational Compressed-Bent Bars with Induced Anisotropy / S.YU. Kalashnikov, E.V. Gurova, R.H. Kuramshin, B. YAzyev // International Scientific Conference on Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies (Moscow 26 November 2021) / eds.: A. Ginzburg, G. Kashevarova. - Springer, Cham, 2022. Vol. 231Pp. 95-102. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7_10.
23. Kalashnikov S.YU., Gurova E.V., SHvedov E.G. Primenenie metoda Bubnova - Galerkina dlya analiza deformirovaniya szhato-izognutogo sterzhnya s inducirovannoj anizotropiej // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. 2022. Vyp. 1 (86). Pp. 132-144.
24. Bandurin N.G., Kalashnikov S.YU. Metod i paket programm dlya chislennogo resheniya sistem sushchestvenno nelinejnyh integro-differencial'no-algebraicheskikh uravnenij (korrektnye po Adamaru dvumernye i trekhmernye kraevye zadachi) // Vychislitel'nye tekhnologii. 2014. T. 19. No. 5. Pp. 3-11.
25. Bandurin N.G., Kalashnikov S.YU. CHislennyj metod i programma dlya opredeleniya kriticheskogo sostoyaniya uprugogo sterzhnya peremennoj zhestkosti v obshchem sluchae zakrepleniya ego koncov // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2015. No. 2. Pp. 4-11.
26. Bandurin N.G., Kalashnikov S.YU. Raschyot szhatyh stoev v sostave prostyh ploskih ram s pomoshch'yu komp'yuternoj programmy i sravnenie rezul'tatov s raschyotami po SP 16.13330.2011 «Stal'nye konstrukcii» // Vestnik Volgogradskogo gos. arhit.-stroit. un-ta. Ser. Stroitel'stvo i arhitektura. 2016. No. 46 (65). Pp. 48-57.
27. Vol'mir A.S. Ustojchivost' uprugih sistem. M.: Fizmatgiz, 1963. 880 p.

Информация об авторах:

Калашников Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия, советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экспертиза и эксплуатация объектов недвижимости».

E-mail: kalashnikov@vstu.ru

Гурова Елена Владимировна

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экспертиза и эксплуатация объектов недвижимости».

E-mail: eun.cafedra@yandex.ru

Бандурин Николай Григорьевич

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, основания и надежность сооружений».

E-mail: bandurin_ng@mail.ru

Information about the authors:

Kalashnikov Sergey Yu.

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, Advisor to the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Examination and Operation of Real Estate objects".

E-mail: kalashnikov@vstu.ru

Gurova Elena V.

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Examination and Operation of Real Estate objects".

E-mail: eun.cafedra@yandex.ru

Bandurin Nikolay G.

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Building Structures, Foundations and Reliability of Structures".

E-mail: bandurin_ng@mail.ru