

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОПЕРЕЧНОЙ НАГРУЗКИ

М. В. ГОРОХОВА

*Нижегородский филиал Самарского государственного университета путей сообщения,
Российская Федерация*

В настоящее время при проектировании и строительстве конструкций широко применяются тонкостенные панели, что требует разработки эффективных и надежных методов их расчета. В работе описан и проанализирован метод определения несущей способности панели (пластины с подкрепляющими ее ребрами жесткости), несущей поперечную нагрузку и сжатой или растянутой вдоль ребер жесткости. На основе метода разработан алгоритм подготовки исходных данных и расчета такой панели с использованием программного комплекса ANSYS.

Как известно, исчерпание несущей способности тонкостенных конструкций при статическом нагружении происходит либо вследствие общей потери устойчивости, либо вследствие исчерпания прочности, когда в каких-либо частях конструкции напряжение достигает предела прочности. Но и в том и другом случаях в конструкции развиваются значительные пластические деформации. Поэтому метод определения несущей способности тонкостенной панели должен основываться на зависимостях теории пластичности. При этом нагружение панели поперечной нагрузкой и продольными силами следует считать сложным. Продольные усилия возникают вследствие общего изгиба конструкции, а потому закон изменения их во времени не всегда совпадает с законом изменения местной поперечной нагрузкой. Но даже в том случае, когда обе нагрузки меняются пропорционально общему параметру, нагружение будет сложным из-за нелинейного влияния продольных усилий на напряжения. Наиболее достоверные результаты можно получить, если проследивать весь процесс деформирования панели по мере изменения нагрузки по заданному закону. Та нагрузка, при которой происходит общая потеря устойчивости панели или напряжение становится равным пределу прочности, и будет предельной. Именно такая постановка задачи и принималась при выполнении ее численного решения.

Для решения поставленной задачи рассматривался упругопластический изгиб пластины совместно с ребрами жесткости с учетом геометрической нелинейности. За основу был взят теоретический подход, предложенный в работе [1], где рассмотрено наступление предельного состояния отдельного сжато-изогнутого ребра и методика численного расчета, которая рассмотрена в работе [2]. При выполнении численного расчета несущей способности панели считалось, что она полностью выполнена из материалов, диаграмма растяжения которых с достаточной точностью может быть изображена двумя наклонными прямыми, сюда можно отнести все алюминиевые сплавы. Наиболее часто употребляемые в теории пластичности модели идеально-пластического тела и линейно-упрочняющегося материала являются частными случаями такой аппроксимации. При этом пластина и ребро могут выполняться из материалов с разными механическими характеристиками.

Была разработана методика подготовки исходных данных для численного расчета тонкостенных панелей, по которой выполнен расчет устойчивости сжатого свободно опертого стержня прямоугольного сечения из идеального пластического материала, несущего равномерно распределенную нагрузку. Сравнение полученных результатов с имеющимся точным решением, показало, что предложенный метод численного решения обеспечивает достаточную точность определения несущей способности стержня.

На основе метода, полученного в работе, будет проведено дальнейшее исследование несущей способности панели с учетом скручивания стержней. Это позволит еще более точно оценивать несущую способность панели, у которой свободный пояс расположен несимметрично относительно ребра, и устойчивость плоской формы изгиба стержней с симметричным профилем. Требуется дальнейшего исследования вопрос о целесообразности учета напряжений и деформаций сдвига. Предполагается также и экспериментальная проверка результатов расчетов. Эксперимент позволит получить не только величину разрушающей пластину нагрузки, но и наиболее полную информацию о распределении напряжений в основных сечениях при различных стадиях нагружения, а также прогибы и углы закручивания. Эксперимент в первую очередь позволит критически оценить результаты численного решения, а также точно выяснить причину исчерпания несущей способности тонко-

стенных панелей: нарушение прочности, общая потеря устойчивости, потеря устойчивости плоской формы изгиба, потеря устойчивости отдельных элементов ребра, нарушение целостности шва и т. п.

Список литературы

1 **Гирин, С. Н.** Предельное состояние сжато-изогнутого ребра судового корпуса / С. Н. Гирин, Т. А. Исаева // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2020. – Спец. вып. 1. – С. 24–27.

2 **Горохова, М. В.** Исследование влияния поперечной нагрузки на величину критической сжимающей силы балки судового корпуса с учетом геометрической и физической нелинейности в программном комплексе ANSYS / М. В. Горохова, И. Н. Шоркина // Конгресс «Великие реки» : сб. тр. – 2020. – Вып. 9. – С. 4.

УДК 539.3

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ О БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ ГИБКИХ НЕОДНОРОДНЫХ ОБОЛОЧЕК

А. Н. ДАНИЛИН^{1,2}, С. И. ЖАВОРОНОК¹, А. С. КУРБАТОВ²

¹*Институт прикладной механики РАН, г. Москва*

²*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Задачи динамики гибких систем – мембранных оболочек и тросов – являются кинематически существенно нелинейными [1] и характеризуются большими амплитудами при перемещении и углах вращения вектора нормали к поверхности оболочки или оси троса [2, 3]. В работе развивается предложенная ранее формулировка теории гибких оболочек [4], основанная на кватернионном представлении вращения нормали [5] при конечно-элементной [4], конечно-разностной или вариационно-разностной схемах [2, 3] дискретизации континуальных соотношениях модели гибкой системы. Применительно к нелинейным задачам статики разработана модификация метода квазидинамического установления [6, 7], адаптированная к формулировке задачи на основе кватернионного представления поворотов.

В качестве первого примера рассмотрена задача о высокоамплитудных низкочастотных нелинейных колебаниях [8] провода линии электропередачи фазных проводов воздушных линий электропередачи, связанных распорками, на основе модели аэроупругих субколебаний тросовых элементов. В качестве второго примера приведено численное решение задачи о деформировании плоской мембраны при конечных перемещениях и углах поворота точек поверхности и при действии следящих сил, основанное на применении метода квазидинамического установления решения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 20-08-00891-а и 19-08-00938-а).

Список литературы

1 **Rabinskiy, L. N.** Analytical mechanics of membrane shells: a review / L. N. Rabinskiy, N. P. Shoumova, S. I. Zhavoronok // Applied Mathematical Sciences. – 2016. – Vol. 10, nos. 41–44. – P. 2189–2204.

2 Нелинейное деформирование многослойных композитных оболочек вращения при больших перемещениях и углах поворота / В. Г. Дмитриев [и др.] // Известия вузов. Авиационная техника. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 169–176.

3 Об одной математической модели деформирования упругих многослойных арочных конструкций при больших перемещениях и углах поворота / В. Г. Дмитриев [и др.] // Известия Тульского гос. университета. Технические науки. – 2017. – № 12-2. – С. 29–36.

4 **Данилин, А. Н.** О кватернионном описании кинематики гибких систем и его приложению к некоторым задачам динамики тросов и мембранных оболочек / А. Н. Данилин, А. С. Курбатов, С. И. Жаворонок // Авиация и космонавтика : тез. докл. 19-й Междунар. конф. – М., 2020. – С. 759–760.

5 **Cottanceau, E.** A finite element/quaternion/asymptotic numerical method for the 3D simulation of flexible cables / E. Cottanceau, O. Thomas, Ph. Veron, M. Alochet // Finite Element Analysis and Design. – 2018. – Vol. 139. – P. 14–34.

6 Исследования устойчивости тонкостенных несущих элементов авиационных конструкций с большими прямоугольными вырезами методом вычислительного эксперимента / В. Г. Дмитриев [и др.] // Известия вузов. Авиационная техника. – 2018. – Т. 61, № 2. – С. 165–174.

7 Adaptation of the establishment method to solve problems of non-linear deformation of shells by the finite element method / O. V. Egorova [et al.] // Asia Life Sciences. – 2019. – Suppl. 21(1). – P. 577–589.

8 **Danilin, A. N.** Nonlinear vibrations and galloping of transmission lines' conductors / A. N. Danilin, S. I. Zhavoronok // Asia Life Sciences. – 2019. – Suppl. 21(1). – P. 629–643.