

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСКАРКАСНЫХ АРОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

*В.Г. АТАПИН, доктор техн. наук, профессор
В.Ю. СКИБА, канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 1 октября 2012 года

Атапин В.Г. – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: obrmet@ngs.ru

Рассматривается сравнительный анализ арочных конструкций, выполненных с использованием плоского и гофрированного стального профиля. Численное моделирование напряженного и деформированного состояния профилей показало, что гофрированный стальной профиль обладает лучшими эксплуатационными характеристиками по сравнению с плоским профилем.

Ключевые слова: математическое моделирование, арочная конструкция, напряженное и деформированное состояние.

Введение

В последнее время при возведении промышленных зданий используются конструкции из гнутых профилей, изготовленных холодной прокаткой из рулонной оцинкованной стали толщиной до 3 мм. Достаточно широкое применение в России нашла разработанная в США уникальная технология изготовления и монтажа бескаркасных арочных зданий из стальных гнутых профилей. В соответствии с этой технологией холодногнутые профили, выполняющие несущие и ограждающие функции бескаркасного покрытия, изготавливаются из рулонной оцинкованной стали толщиной 0,8...1,2 мм непосредственно на строительной площадке, используя два передвижных профилегибочных агрегата [1]. Один из них формирует прямолинейный профиль корытообразного сечения высотой 300 и шириной полка 110 мм, другой – вальцует этот профиль по заданному радиусу (не менее 2 м) с образованием волнистых поперечных гофров на стенке и полках. Профили соединяют между собой вдоль продольных краев без метизов крепления, используя фальцегибочную машинку. Узлы крепления арочного покрытия к фундаменту, расположенному вдоль его продольных краев, соответствуют жесткому закреплению. Прочностная

надежность и эффективность такой конструкции зависит от того, насколько точно в расчете учтены особенности ее работы, связанные с назначением расчетных нагрузок, тонкостенностью профиля, начальной волнистостью поверхности их граней, жесткостью фальцевых соединений и др. К основным факторам, сдерживающим расширение области применения этих конструкций, относят, в частности, недостаточную экспериментально-теоретическую базу данных о работе новых конструкций из гнутых профилей при статических и динамических нагрузках.

В настоящей работе приводится сравнительный анализ арочных конструкций с использованием плоского и гофрированного профиля по результатам математического моделирования и натурального эксперимента.

Математическое и натурное моделирование

3D-модели фрагментов и конструкции в целом подготовлены посредством систем *SolidWorks* и *PowerShape* [2, 3]. Использование второй CAD-системы обусловлено необходимостью детальной прорисовки стыковых поверхностей зоны «стенка-полка», имеющих достаточно сложную геометрию (рис. 1). В процессе про-

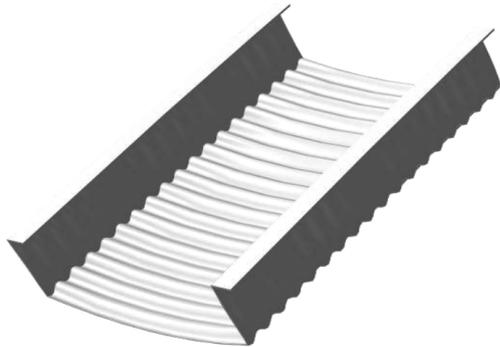


Рис. 1. Реальный фрагмент гофрированного профиля

ектирования моделей использовалась комбинация графических объектов: зоны стенок и полок представлялись в виде поверхностей, а зоны фальцевых соединений и фундамент моделировали твердыми телами. Расчет напряженного и деформированного состояния объектов осуществлялся в программном комплексе *ANSYS* [4]. При подготовке конечно-элементной модели применялась регулярная сетка с использованием следующих типов конечных элементов: *Link167*, *Shell163*, *Solid 164* и *Conta173* [5, 6].

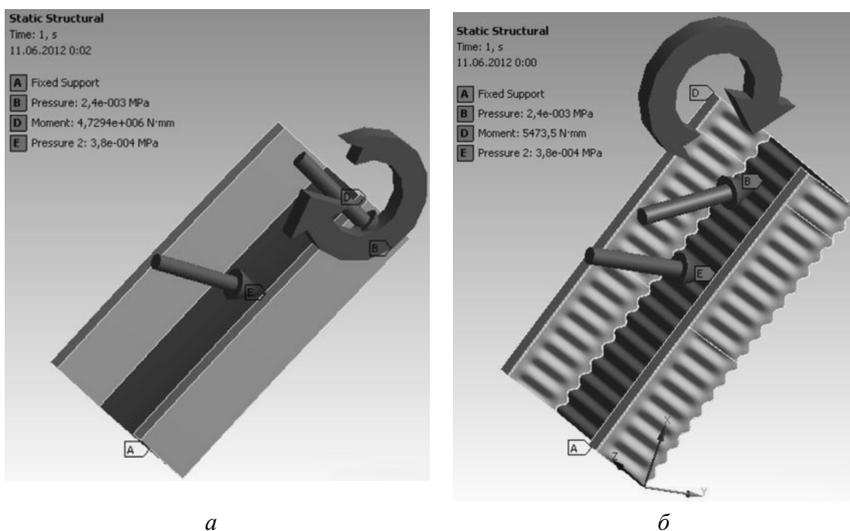
На начальном этапе была произведена сравнительная оценка работоспособности гофрированного и плоского профиля элементов арки. На рис. 2 представлены расчетные схемы фрагментов для плоского и гофрированного профиля.

В результате проведенного сравнительного анализа поведения гофрированного и плоского профилей были получены следующие результаты.

1. В условиях нагрузочной схемы, представленной на рис. 2, *а*, максимальный уровень эквивалентных (по *Мизесу*) напряжений составлял 346,62 МПа (рис. 3, *а*), максимальная деформация равна 5,66 мм (рис. 3, *б*). В рассматриваемом варианте коэффициент запаса прочности профиля достигал значения 0,72.

2. При нагружении гофрированного профиля (рис. 4) (высота волны – 10 мм, длина волны – 30 мм), уровень напряжений достиг значений 24,33 МПа (рис. 4, *а*), максимальная деформация равна 0,17 мм (рис. 4, *б*). Минимальное значение коэффициента запаса прочности равно 10,28.

В результате проведенного численного исследования зафиксировано, что гофрированный профиль способствует равномерному распределению нагрузки по всем его поверхностям (см. рис. 4), вследствие чего фактически становится возможным увеличить в 10–14 раз

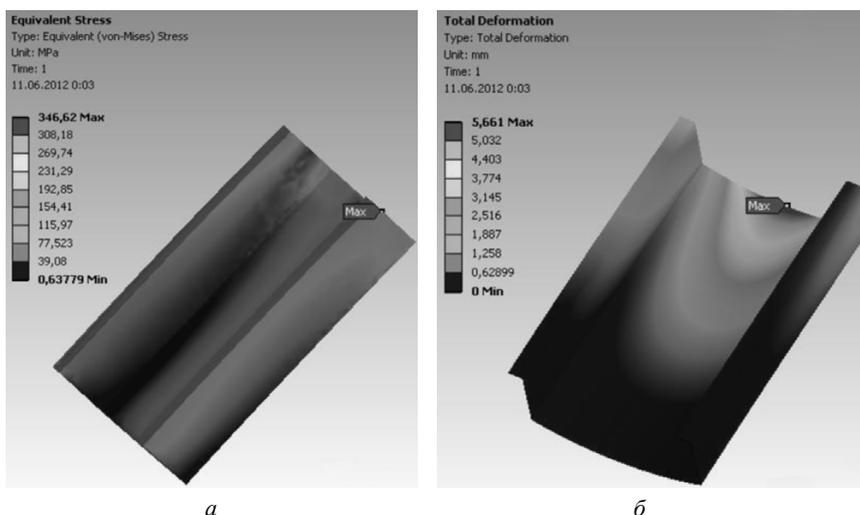


а

б

Рис. 2. Расчетная схема:

а – для плоского профиля; *б* – для гофрированного профиля



а

б

Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние в плоском профиле:

а – распределение эквивалентных напряжений; *б* – распределение деформации



несущую способность конструкции по сравнению с плоским профилем. На основе математического эксперимента введена корректировка в жесткостные параметры плоской модели, заключающаяся в изменении геометрии зон стыка и повышении модуля упругости с $2,1 \cdot 10^5$ МПа до уровня $13,4 \cdot 10^5$ МПа. Следует заметить, что переход от гофрированной к плоской модели позволил уменьшить количество конечных элементов с 2,1 млн до 510 тыс.

Для подтверждения адекватности использованных математических элементов профилей был проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных результатов.

Натурный эксперимент проводили на производственном ангаре (рис. 5): длина – 22 м; ширина – 21,7 м; высота – 7,4 м. В центре верхней части сооружения к предварительно закрепленному кронштейну поочередно подвешивались грузы массой 172, 105 и 55 кг. Упругие перемещения кронштейна фиксировались бесконтактным методом посредством использования лазерного дальномера *Bosch GLM 150 Professional* с точностью измерений $\pm 0,5$ мм. В итоге были получены следующие результаты: построенная математическая модель обладает высокой степенью *адекватности*: при действии нагрузок 172, 105 и 55 кг были зафиксированы следующие абсолютные

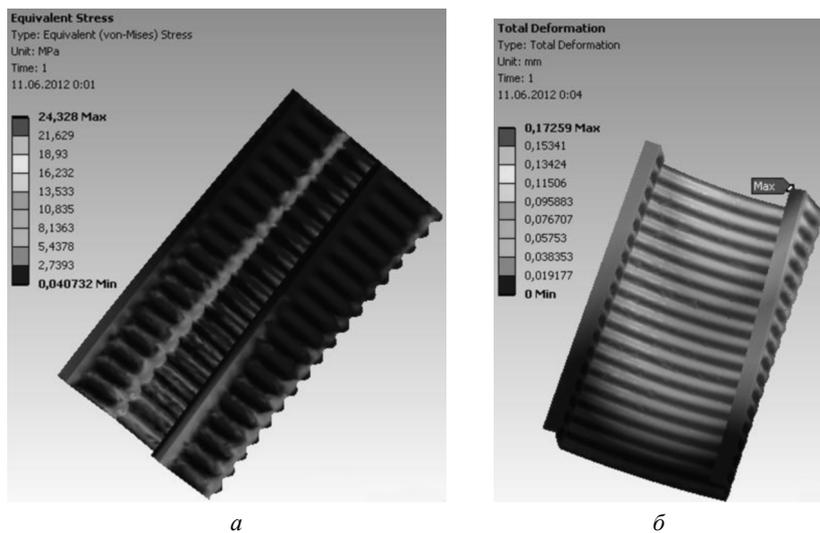


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние в гофрированном профиле:
 а – распределение эквивалентных напряжений; б – распределение деформации

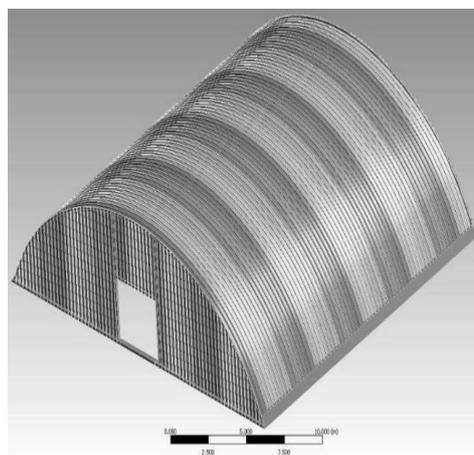


Рис. 5. Модель ангара

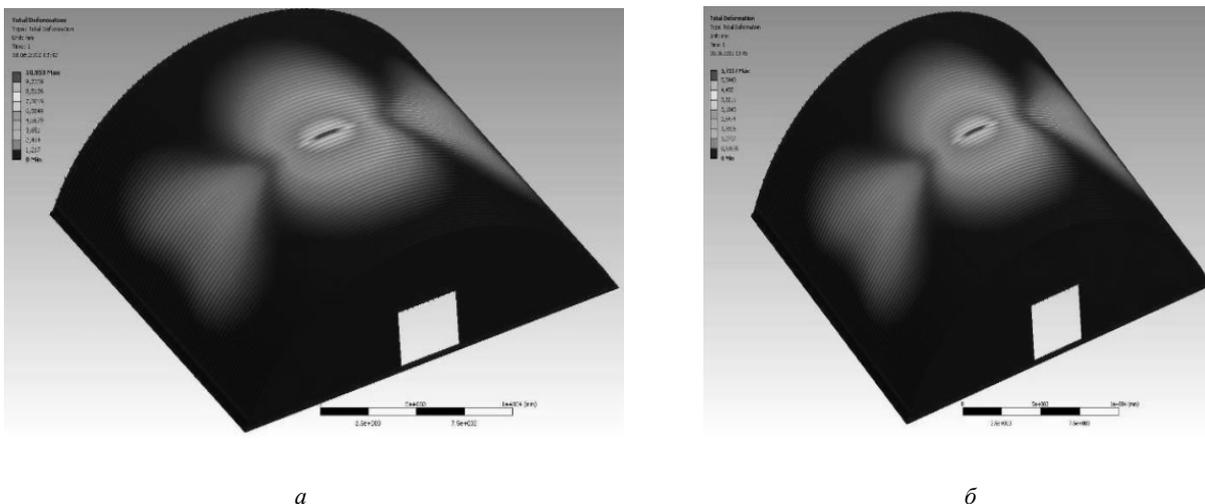


Рис. 6. Моделирование напряженно-деформированного состояния ангара для натурального эксперимента:
 а – абсолютная деформация среднего участка ангара при нагрузке 105 кг (1030 Н) – 10,95 мм;
 б – абсолютная деформация среднего участка ангара при нагрузке 55 кг (539 Н) – 5,73 мм

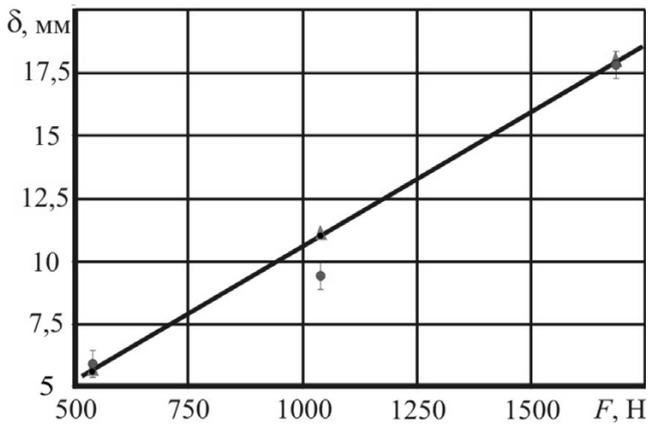


Рис. 7. Результаты экспериментов:

▲ – данные численного эксперимента; ● – данные натурального эксперимента с доверительным интервалом

перемещения: $18 \pm 0,5$ мм, $9,5 \pm 0,5$ мм и $5,5 \pm 0,5$ мм соответственно; при математическом анализе поведения рассчитываемой конструкции были получены следующие результаты: 172 кг (1686 Н) – 17,93 мм; 105 кг (1030Н) – 10,95 мм (рис. 6, а); 55 кг (539Н) – 5,73 мм (рис. 6, б).

На рис. 7 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Видно, что результаты математического моделирования в основном совпадают с данными натурального эксперимента. Исключение составляет средняя точка, погрешность определения которой является, по-видимому, погрешностью при проведении эксперимента.

Данные результаты подтвердили правильность принятых упрощений математической модели и позволили перейти к расчету базовой геометрической модели производственного ангара.

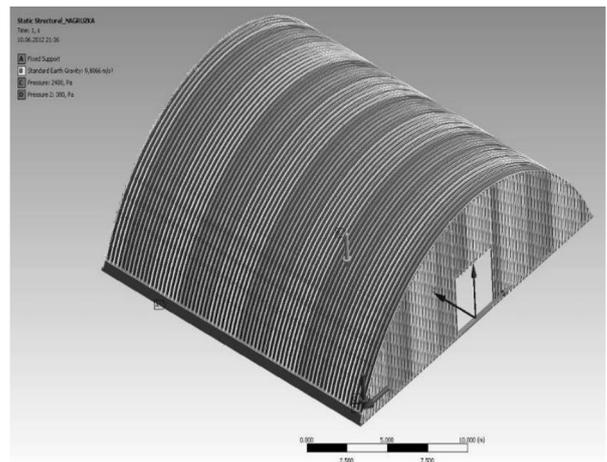
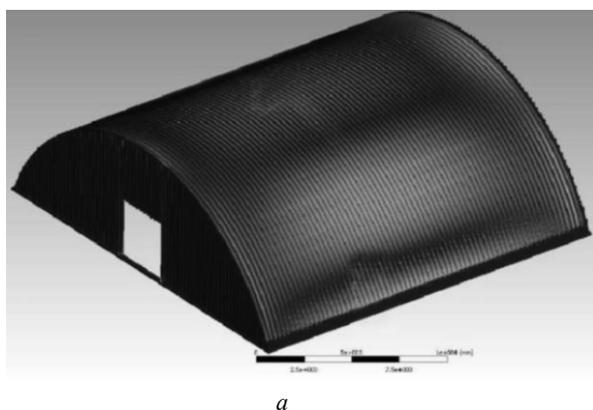


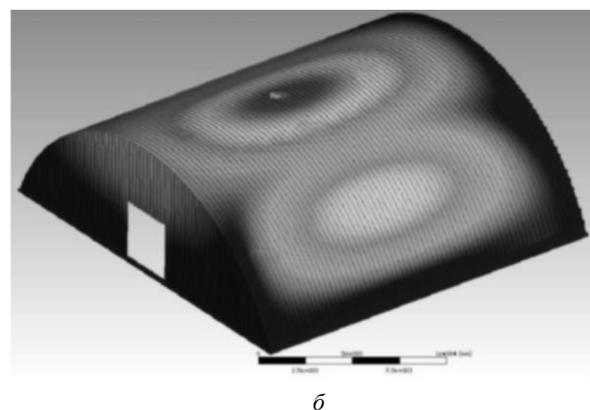
Рис. 8. Начальные и граничные условия

После предварительной подготовки геометрии в системе *SolidWorks*, 3D-модель импортировалась в оболочку комплекса *ANSYS*:

- в меню «*Engineering Data*» введены значения физико-механических свойств конструктивных элементов;
- в дереве проекта, в ветви «*Contact*», определены контактные поверхности между конструктивными элементами: для фальцевых зон и зоны контакта гофрированных дуг с фундаментом выбрано неподвижное соединение «*Bonded*»; для зон соприкосновений профилей по боковым поверхностям – контакт «*Rough*» с параметром шероховатости Rz 80 мкм;
- после разбиения на конечные элементы, параметры которого представлены выше, в ветви модели «*Environment*» осуществлен ввод граничных и начальных условий задачи. В опции «*Inertial*» выбором «*Standard Earth Gravity*» учтено влияние на конструкцию силы



а



б

Рис. 9. Моделирование напряженно-деформированного состояния ангара при рабочей нагрузке: а – эквивалентные напряжения; б – распределение абсолютной деформации

тяжести. В разделе «*Supports*» по нижней плоскости основания ангара назначено ограничение «*Fixed Support*» – лишение фундамента здания всех степеней свободы; в меню «*Loads*» согласно строительным нормам и правилам (СНиП 2.01.07–85) осуществлено приложение нагрузок и воздействий (рис. 8). Для г. Новосибирска и Новосибирской области они составляют: IV снеговой район – 2,4 кПа, давление ветра (III район) – 0,38 кПа.

В результате проведенного моделирования напряженно-деформированного состояния ангара при действии указанных нагрузок были получены следующие результаты:

- эквивалентные напряжения достигли уровня 15,7 МПа (рис. 9, а);
- максимальная деформация составила 3,13 мм (рис. 9, б);
- минимальное значение коэффициента запаса прочности равно 11,34, что является достаточным для эксплуатации данного сооружения в обозначенном сибирском регионе.

Список литературы

1. Айрумян Э.Л., Беляев В.Ф. Эффективные холодногнутые профили из оцинкованной стали – в массовое строительство // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – № 11. – С. 10–17.
2. *SolidWorks 2011 Help*, 2011.
3. *Автоматизированное проектирование деталей сложной геометрии с использованием программного продукта PowerShare: справ. пособие* / Д.В. Тинников, В.В. Иванцовский. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 67 с.
4. *ANSYS Workbench Help*, 2010.
5. *Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие. Часть 1* / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.: ил.
6. *Lawrence Kent L. ANSYS Workbench Tutorial Release 11.* – Schroff Development Corporation, 2007. – 236 p.

Numerical simulation of frameless arched covers

V.G. Atapin, V.Yu. Skeeba

The comparative analysis of the arch designs executed with use of a flat and a goffered steel profile is considered. Numerical modeling of mode of profiles deformation has shown that the goffered steel profile possesses the best operational characteristics in comparison with a flat profile.

Key words: mathematical simulation, arching, stress and strain state, mode of deformation.