

УДК 624.014:624.073.8:624.074.4

Использование стальных профилированных листов в криволинейных растянутых поверхностях

Евгений Юрьевич ДАВЫДОВ, кандидат технических наук

Белорусский национальный технический университет, 220037 Минск, Республика Беларусь, пр-т Независимости, 65, e-mail: davydovevg13@yandex.ru.

Проанализирован опыт использования конструктивно-анизотропных материалов (стальные профилированные листы) в криволинейных поверхностях в виде гиперболических панелей-оболочек индустриального изготовления. Применение этих материалов по сравнению с изотропными вносит качественные изменения в напряженно-деформированное состояние пролетной конструкции и элементов опорного контура панелей-оболочек. Диск покрытия из панелей-оболочек, где в качестве пролетной конструкции используются стальные профилированные листы, обладает сдвиговой жесткостью, достаточной для обеспечения пространственной работы каркаса здания. Все результаты, приведенные в статье, получены на основании экспериментальных исследований натурных образцов.

Ключевые слова: панель, оболочка, профилированный настил, модуль, жесткость, покрытие.

THE USE OF PROFILED SHEETS IN CONSTRUCTION OF CURVILINEAR EXTENDED SURFACES

Evgeny Yu. DAVYDOV

In the current article we discuss the use of constructive anisotropic materials (steel profiled sheets) in curvilinear surfaces in the form of hyperbolic industrial panels-envelopments. The use of constructive anisotropic materials, compared to isotropic materials, inserts considerable changes to the strained-misshapen condition of span construction and the elements of supporting circuit of panels-envelopments. The covering disc which is made of panels-envelopments has a shearing rigidity which is enough for spatial work of building's frame. In this case the steel profiled sheets are used as a span construction. All results named in the article are based on the research of real models.

Key words: panel, envelopment, profiled deck, module, rigidity, surface.

В настоящее время стальные профилированные листы используют преимущественно в конструктивных формах, работающих на изгиб. В статье проанализированы результаты экспериментальных исследований и опыт применения стальных профилированных листов в качестве пролетной конструкции гиперболических панелей-оболочек покрытий, где они работают преимущественно на двухосное растяжение.

Особенностью профилированных листов является резкая конструктивная анизотропия, т. е. неодинаковость физических характеристик — модулей деформации. Она обусловлена формой листов: в направлении вдоль гофров модуль деформации постоянный и равен модулю упругости стали, а в перпендикулярном — является величиной значительно меньшей и переменной.

На рис. 1а приведены диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » для профилированных листов с высотой гофра 60 и 80 мм в направлении поперек гофров, полученные экспериментально. Длина пологой части диаграммы обуслов-

лена, прежде всего, коэффициентом гофрированности: чем он больше, тем длиннее пологая часть диаграммы. В реальных конструкциях значения относительных деформаций, как правило, ограничиваются предельными перемещениями и не превышают 8 %. В пределах этого значения перемещения обусловлены изменением формы гофров, материал при этом работает упруго. Если рассмотреть сечения профилированного листа в процессе деформирования как статически неопределимую конструктивную форму при упругой работе металла, то значение модуля деформаций можно выразить следующей формулой:

$$E_i = E \frac{t^2}{4h^3} \frac{\ell + 2h}{2 + h/\ell} \quad (1)$$

где $\ell = 0,5(S - b_1 + b)$; размеры S, t, h, b, b_1 указаны на рис. 1а.

Из сопоставления экспериментальных результатов со значениями, полученными по формуле (1), следует, что эти значения модуля деформации имеют отклонения в пределах 5–15 % — с уменьшением высоты

гофра погрешность увеличивается. Появление погрешности можно объяснить тем, что формула (1) не учитывает наличия уступов в стенке, рифления в полках и закруглений в углах гофров.

Сдвиговая жесткость профилированных листов, расположенных в плоскости, исследована в работах [1–4].

Для определения сдвиговой жесткости стальных профилированных листов в виде поверхностей отрицательной гауссовой кривизны была запроектирована установка, позволяющая исследовать листы настила с различной формой гофра, при разной кривизне и различном закреплении торцов. Модуль сдвига определяли при свободных торцах и при торцах, закрепленных к жестким элементам, направленным поперек гофров. Результаты испытаний представлены на рис. 1б. При свободных торцах с увеличением кривизны листов их жесткость уменьшалась, перемещения в направлении сдвигающей силы увеличивались. На рис. 1б кривая 1 соответствует пло-

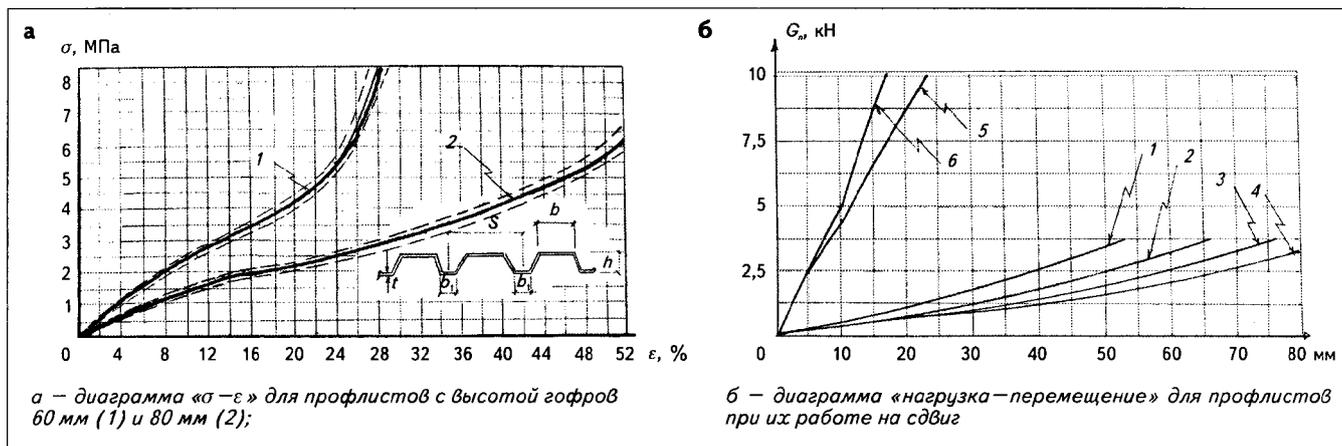


Рис. 1. Физические характеристики стальных профилированных листов

ским листам (превышение углов равно 0); кривая 2 — гиперболической поверхности с радиусом кривизны 2500 мм; кривая 3 — с радиусом кривизны 1250 мм и кривая 4 — с радиусом кривизны 830 мм. Соответственно значения модулей сдвига равны 446, 398, 336 и 234 МПа. По мере возрастания нагрузки на образцы, имеющие форму гипара со свободными торцами, ширина гофров изменялась: со стороны верхнего узла гипара увеличивалась, а со стороны нижнего уменьшалась. Например, при нагрузке 3 кН ширина гофров составила 265, 215, 190 и 175 мм (сверху вниз) при исходной ширине 217 мм. При этом, в конечном итоге, увеличение сдвигающей нагрузки приводило к потере местной устойчивости широких граней гофров.

При закреплении торцов профилированных листов к жестким поперечным элементам сдвиговая жесткость листов резко увеличивалась и, что наиболее важно, мало зависела от кривизны.

На рис. 1б этому состоянию соответствуют кривая 5 (момент инерции поперечных элементов равен 12 см^4) и кривая 6 (момент инерции равен 27 см^4). Модуль сдвига при закреплении торцов профилированных листов к жестким элементам равен 4375 МПа. Другой вывод по результатам этих испытаний: изгибная жесткость поперечных элементов не оказывает существенного влияния на сдвиговую жесткость профилированных листов. Для определения модуля сдвига профилированных

листов при закреплении их торцов может быть использована следующая формула:

$$G_n = 0,083G/K, \quad (2)$$

где G — модуль сдвига плоских стальных образцов; K — коэффициент гофрированности.

Определение модуля сдвига по формуле (2) предполагает упругую работу металла и обеспечение местной устойчивости гофров профилированных листов. Один из вариантов конструктивной формы при использовании двухосного напряженного состояния стальных профилированных листов — панель-оболочка, которая состоит из двух элементов: пространственного замкнутого опорного контура и пролетной конструкции.

Опорный контур собирается из прокатных или холодногнутых профилей и образует замкнутую раму. Пролетная конструкция образуется из стальных профилированных листов, при этом их гофры располагаются в продольном направлении (вдоль большего размера опорного контура) и профилированный лист закрепляется по периметру к опорному контуру. При ширине не более 3 м и длине не более 24 м панель-оболочку можно полностью изготавливать в заводских условиях [5]. Форма поверхности пролетной конструкции — гиперболический параболоид — в наилучшей степени обеспечивает распределение усилий в элементах опорного контура и пролетной конструкции.

Сопоставление полученных экспериментально основных парамет-

ров напряженно-деформированного состояния гиперболических и плоских панелей показывает, что осевые силы в пролетной конструкции в виде поверхности отрицательной гауссовой кривизны уменьшаются на 5–27 % по сравнению с плоской поверхностью, а изгибающие моменты — на 3–8 %. Изгибающие моменты в элементах опорного контура уменьшаются на 34–37 %.

Отрицательным фактором является увеличение осевых сил в опорном контуре на 10–16 %, однако оно компенсируется более благоприятным распределением усилий по длине элемента опорного контура (об этом будет сказано ниже). Кроме того, гиперболическая форма пролетной конструкции дает возможность иметь внешний водоотвод и обеспечивает лучшую архитектурную выразительность интерьера.

Следует также отметить, что использование стальных профилированных листов существенно упрощает формообразование поверхностей отрицательной гауссовой кривизны — без специального раскроя листов и без сварки тонких листов.

В традиционных гипарах с планом, близким к квадрату, и с пролетной конструкцией из изотропного материала или материала, близкого к изотропным, осевые усилия как в пролетной конструкции, так и в элементах опорного контура двузначные: в пролетной конструкции возникают не только растягивающие, но и сжимающие напряжения, а в опорном контуре по его длине сжимающие усилия переходят в растя-

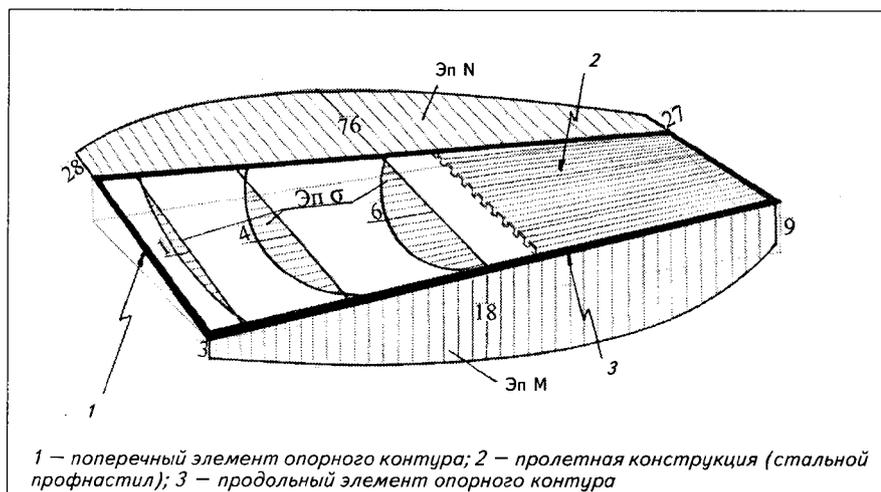


Рис. 2. Эпюры напряжений в пролетной конструкции (МПа), эпюры осевых сил (кН) и изгибающих моментов (кН·м) в продольных элементах опорного контура панелей-оболочек

гивающие и наоборот [6]. Использование стального профилированного настила при существенной разнице между шириной и длиной гипара вносит качественное изменение в напряженно-деформированное состояние, прежде всего, исключаются сжимающие усилия в срединной поверхности пролетной конструкции.

На рис. 2 приведены эпюры напряжений, иллюстрирующие распределение напряжений в продольном направлении панели-оболочки при равномерно распределенной нагрузке, а также эпюры осевых сил в продольных элементах опорного контура. Осевые силы только сжимающие, и их значения не являются постоянными по длине элемента: значения осевых усилий в центральной части пролета в 3–4 раза превышают их значения в крайних частях. Такое распределение осевых сил уменьшает значения расчетных длин, используемых при проверке общей устойчивости.

Значения напряжений и осевых сил, приведенные на рис. 2, получены в процессе экспериментальных исследований панелей-оболочек размером в плане 2×12 м. В процессе экспериментальных исследований также было установлено, что для определения параметров напряженно-деформированного состояния пролетной конструкции из стального профилированного настила при действии вертикальной нагрузки могут быть использованы

уравнения усилий и перемещений, полученные для жестких нитей [7].

Панели-оболочки покрытий после их монтажа и взаимного соединения образуют диск, обеспечивающий пространственную работу каркасов зданий и сооружений. Жесткость диска и, следовательно, степень пространственности каркаса, обеспечиваются четырьмя факторами: сдвиговой жесткостью стального профилированного настила (см. выше), жесткостью замкнутой рамы, образующей пространственным опорным контуром, жесткостью соединений пролетной конструкции с элементами опорного контура и жесткостью взаимных соединений панелей-оболочек. Для определения суммарной жесткости диска из панелей-оболочек с учетом этих факторов были проведены экспериментальные исследования фрагмента покрытия из четырех панелей-оболочек. По результатам эксперимента значение модуля сдвига для диска покрытия из гиперболических панелей-оболочек можно принять равным 1700 МПа. При указанном модуле сдвига значение коэффициента пространственной работы каркаса здания за счет только жесткости диска покрытия обеспечивается в пределах 0,6–0,9 при шаге колонны 6 м и 0,4–0,75 при шаге колонны 12 м.

Панели-оболочки отрицательной гауссовой кривизны с использованием стальных профилированных листов в качестве пролетной конструк-

ции нашли применение при строительстве ряда объектов общественного и производственного назначения.

Выводы

1. Использование стальных профилированных настилов в качестве пролетной конструкции в панелях-оболочках в виде гипара приводит к качественному изменению напряженного состояния в срединной поверхности пролетной конструкции.

2. Осевые усилия в продольных элементах опорного контура становятся однозначными (сжимающими) и увеличиваются от краев к середине, что приводит к уменьшению расчетной длины в расчетах на устойчивость.

3. Диск покрытия, образованный из гиперболических панелей-оболочек с использованием стального профилированного настила, обладает достаточной жесткостью для обеспечения пространственной работы каркаса здания.

4. Применение стальных профилированных листов облегчает образование поверхностей с линейчатыми образующими, например гиперболических параболоидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ольков Я. И., Засыпкин В. С. Оценки жесткости обшивки панельно-структурного торца главного корпуса ТЭС // Энерг. стр-во. 1978. № 9. С. 4–7.
2. Айрумян Э. Л. Сдвиговая жесткость стального профилированного настила покрытий: реф. информация /ЦИНИС. М., 1976. 22 с. (Сер. VIII, вып. 11).
3. Мартынов Ю. С., Шевченко С. В. Экспериментальные исследования на сдвиг фрагментов диска беспрогонного покрытия здания из ЛМК // Сб. тр. Ассоциации кафедр МК вузов СНГ. Киев, 1993. Вып. 2. С. 108–117.
4. Давыдов Е. Ю., Нестеренко Н. Л. Покрытие зданий из стальных гиперболических панелей // Пром. стр-во. 1985. № 9. С. 4–6.
5. Еремеев П. В. Пространственные тонколистовые металлические конструкции покрытий. М.: АСВ, 2006. С. 221–232.
6. Давыдов Е. Ю., Трофимов В. И., Нестеренко Н. Л. Расчет стальных гиперболических панелей на пролет // Строит. механика и расчет сооружений. 1986. № 5. С. 7–11. ■