

- отсутствие напрягаемой арматуры в перегородках коробчатых балок,
- улучшается качество бетона перегородок и диска проезжей части, а, следовательно, и их долговечность.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очень часто при рассмотрении конструктивных решений, в которых использованы элементы с внешней предварительно напряженной арматурой, в качестве основного недостатка выделяют повышенные издержки, необходимые для возведения такого рода конструкций. Оцениваются, к сожалению, только производственные расходы. Если, тем не менее, принять во внимание повышение качества и долговечности таких мостов, что исключает необходимость выполнения последующих усиленных пролетных конструкций и т.д., то такие конструктивные решения мостов окажутся не так дороги, как это часто кажется при первичном анализе. Если предположить, что в будущем будет возводиться все больше мостов с внешней напрягаемой арматурой, это приведет, в конечном итоге, к снижению их стоимости, а также повышению конкурентоспособности по сравнению, например, с преднапряженными мостами, у которых напрягаемые стержни имеют сцепление с бетоном.

Министерство транспорта Германии приняло конструкции с внешней предварительно напряженной арматурой в качестве стандартного типа мостовых конструкций. Это обстоятельство, в свою очередь, приветствовалось проектировщиками [8]. В заключении можно добавить, что современные стандарты качества при применении конструкций с внешней преднапряженной арматурой исключают такое определение как "дешевое решение".

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ajdukiewicz A., Mames J. Konstrukcji sprężone.- Arkady, 1982. - 431 p.
2. Eibl, J und Voss, W.: Zwei Autobahnbruecken mit externen Vorspannung. Beton- und Stahlbetonbau 84 (1989), H.11, S.291-296.
3. Metzler, H und Schmitz, Ch.: Spannbetonbruecken mit externer Vorspannung – Historischer Rueckblick und Erfahrungen einer Strassenbauverwaltung. Bauingenieur 73 (1998), S.83-88.
4. Образцов О.Л. Прочность комбинированно предварительно напряженных элементов без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном при действии изгибающих моментов. Дис. ... канд.техн.наук. -Брест, 2002.
5. Krautwald, W., Thormaehlen, U. Und Schuett, K.: Talbruecke Berbke, Taktschiebebruecke mit externer Vorspannung. Wiesbaden: Deutscher Betonverein e.V., Spannbetonbruecken in der Bundesrepublik Deutschland 1987-1990.
6. Krautwald, W., Thormaehlen, U.: Prestressed Concrete Bridges with external Prestressing – Experience in the Areas of Design and Construction, FIP Structural Concrete 1997-1998.
7. Standfuss, F.: Neue Entwicklungen im Brueckenbau – 8.Dresdener Brueckenbausymposium 1998.
8. Standfuss, F., Abel, M. und Haveresch, K.-H.: Erlauterungen zur Richtlinie fuer Betonbruecken mit externer Spannglieder. Beton- und stahlbetonbau 93 (1998), H.9, S.264-272.
9. Metzler, H., Peuckert, L. und Schmitz, Ch. Strothetalbruecke – Taktschieben mit interner und externer Vorspannung. Beton und Stahlbetonbau 90 (1995), H.1, S. 10-15.
10. Krautwald, W. Extern vorgespannte Bruecken – Erfahrungsbericht eines Bauausfuehrenden. Externe Vorspannung und Segmentbauweise, Workschop, 5.-7. Oktober 1998, Karlsruhe.

УДК 624.074.4.014.2

Давыдов Е.Ю.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ-ОБОЛОЧЕК ПОКРЫТИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Стальные панели-оболочки разработаны для покрытий зданий и сооружений массового применения. Особенностью панелей-оболочек является геометрическая форма – гиперболический параболюид и материал пролетной конструкции – стальной профилированный настил, образующий поверхность отрицательной гауссовой кривизны (см. рис.1). Использование в панелях-оболочках поверхности отрицательной кривизны предопределяет наиболее благоприятное распределение усилий в элементах опорного контура, упрощает устройство водоотвода (отметка средней точки превышает от-

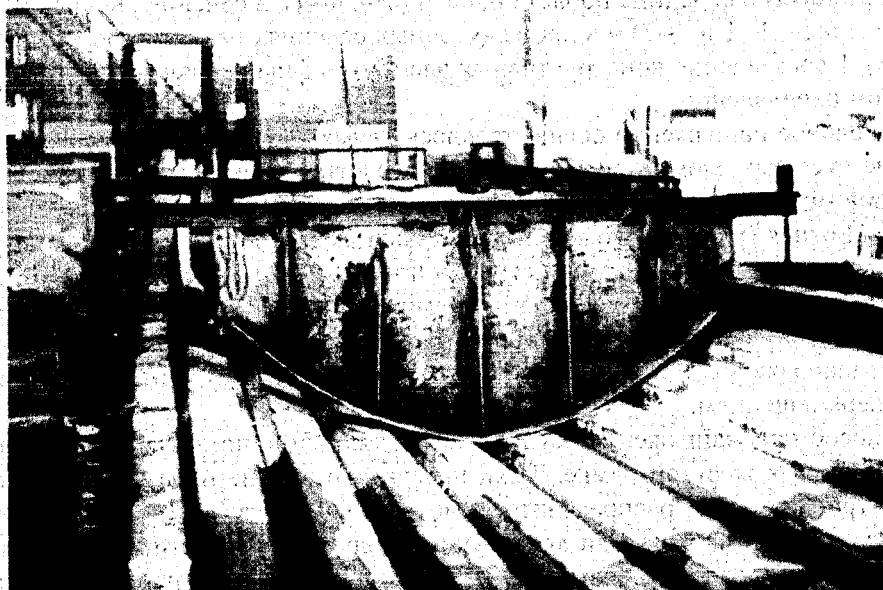
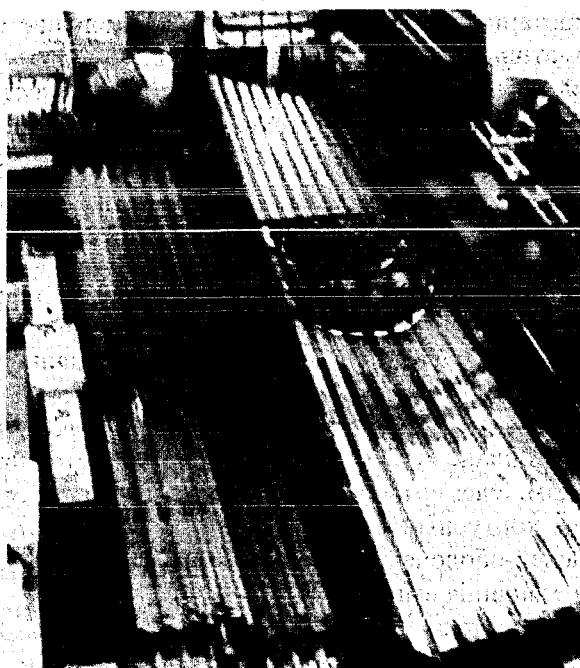


Рисунок 1 – Преднапряжение панели-оболочки с помощью штампа

метки крайних точек), обеспечивает возможность образования подстропильных конструкций с использованием поперечных элементов опорного контура панелей-оболочек. Применение профилированного настила в качестве пролетной конструкции, обладающего резкой конструктивной анизотропией, позволяет существенно уменьшить нагрузку на продольные наиболее металлоёмкие элементы опорного контура, упрощает формообразование поверхности отрицательной кривизны, исключает образование складок в нижних углах гиперболического параболоида. Панели-оболочки имеют ширину, в плане равную 3 метрам, и длину, равную пролету здания, и, таким образом, исключают необходимость использования стропильных конструкций.

По результатам проведенных исследований и по данным опытного внедрения в практику строительства можно отметить следующие преимущества покрытий из панелей-оболочек по сравнению с традиционными решениями: снижение трудовых затрат достигает 21%; расход металла уменьшается на 10-15%. По сравнению со зданиями, где по условиям эксплуатации требуется подвесной потолок, экономическая эффективность увеличивается в 2...2,5 раза. Кроме того, панели-оболочки уменьшают строительную высоту покрытия на 1...2м, что уменьшает усилия в элементах поперечной рамы здания и сокращает эксплуатационные расходы, прежде всего, расходы на отопление.

К недостаткам разработанных решений покрытий с применением панелей-оболочек можно отнести повышенную деформативность пролетной конструкции, которая проявляется при нагрузке на покрытие более 3 кПа и при пролетах более 18 м. Повышение жесткости панелей-оболочек наиболее эффективно достигается с помощью предварительного напряжения. Для изучения напряженно-деформированного состояния панелей-оболочек в процессе преднапряжения и в процессе нагружения внешней нагрузкой были проведены экспериментальные исследования.

Задачи экспериментального исследования: проверка способа преднапряжения панелей-оболочек с помощью съемных элементов и отработка технологических операций, связанных с преднапряжением; изучение напряженно-деформированного состояния панелей-оболочек на различных этапах преднапряжения; разработка конструктивных решений панелей-оболочек, обусловленных преднапряжением; определение особенностей работы преднапряженных панелей под нагрузкой; выявление предпосылок для разработки метода расчета панелей-оболочек в стадии преднапряжения.

Для проведения экспериментальных исследований использовались панели длиной 12 м и шириной 1,76 м. Размеры панелей в плане определялись размерами листов профнастила. Разность отметок углов панелей составляла 0,5 м. Элементы опорного контура были изготовлены из гнутых швеллеров сечением 160x80x4. Сечения контурных элементов назначались с учетом результатов испытаний рядовых ненапряженных панелей-оболочек. Пролетная конструкция собиралась из двух листов профнастила Н60-845-1.0. Все соединения выполнялись на болтах.

Исходя из задач экспериментальных исследований, были использованы приборы для измерения относительных деформаций и перемещений в характерных точках панелей. Тензорезисторы наклеивались в семи сечениях: в середине пролета панели (сеч. 4--4), в сечениях вблизи поперечных сторон опорного контура (сеч. 1--1 и 7--7) и в промежуточных сечениях на расстоянии  $1/6$  пролета (сеч. 2--2, 3--3, 5--5 и 6--6). Перемещения конструктивных элементов фиксировались как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении.

Предварительное напряжение осуществлялось двумя способами. Первый способ предусматривал вдавливание съемных элементов (штампов) в пролетную конструкцию. В реальных условиях в качестве штампов могут быть использованы стаканы зенитных фонарей. Штампы устанавливались в третях пролета. Нижняя (рабочая) поверхность штампа имела форму квадратной параболы, т.е. форму пролетной конструкции в поперечном сечении при действии равномерно распределенной нагрузки. Вдавливание штампа производилось домкратами с использованием жесткой рамки, соединенной монтажной сваркой с продольными элементами опорного контура. Жесткая рамка не только передавала усилия преднапряжения с пролетной конструкции на опорный контур, но и препятствовала горизонтальным перемещениям.

Второй способ преднапряжения осуществлялся тяжами, с помощью которых пролетная конструкция притягивалась к жесткой рамке. Тяжи передавали усилие предварительного напряжения на пролетную конструкцию через распределительные пластины, в качестве которых могут быть использованы элементы усиления пролетной конструкции. Целью этих пластинок было распределение сосредоточенного усилия, создаваемого тяжами, на большую площадь пролетной конструкции. Преднапряжение контролировалось значениями напрягающих усилий и значениями перемещений в узлах приложения напрягающих усилий. Ниже приведены основные результаты экспериментальных исследований, характеризующие, прежде всего, качественные изменения напряженно-деформированного состояния пролетной конструкции и элементов опорного контура панелей-оболочек.

На рис. 2 приведены эпюры изгибающих моментов в пролетной конструкции при давлении в домкратах 1,75 и 3 кн. Для определения значений изгибающих моментов пролетная конструкция в поперечном направлении была условно разделена на отдельные стержни (1...7). В состав каждого стержня включена узкая полка и две половинки двух широких полок гофра: слева и справа от узкой полки гофра. Такой состав сечения условного стержня позволил в наибольшей степени снизить влияние случайных факторов, неизбежных при проведении экспериментальных исследований тонколистовых оболочек.

Как видно из приведенных эпюр, наибольшие изгибающие моменты зафиксированы в средних стержнях (в стержнях № 3, 4, 5) и наименьшие в крайних стержнях (№ 1, 7). Это объясняется, прежде всего, неравномерным распределением давления от штампов. Это обусловлено формой рабочей поверхности штампа – в начальный момент преднапряжения штамп имеет контакт только со средним стержнем и при вдавливании загружает только его. При этом другие стержни загружаются только за счет поперечной жесткости профнастила. По мере вдавливания штампа его давление распространяет-

ся на стержни, соседние с центральным, что проявляется на форме эпюр моментов - в местах передачи давления в эпюрах «М» отчетливо прослеживается изменение угла наклона. Что касается крайних стержней, то их контакт со штампом появляется в самый последний момент и давление на них не успевает достигнуть существенного значения.

В местах приложения давления от штампов изгибающие моменты имеют положительные значения (наиболее растянуты нижние полки гофров). Это прослеживается на всех стержнях, кроме крайних, где давление от штампа, как было сказано выше, не достигает существенного значения. В середине пролета каждого стержня изгибающий момент меняет свой знак: наиболее растянутыми становятся широкие (верхние) полки гофров. При отсутствии внешней нагрузки это возможно только за счет поперечной жесткости пролетной конструкции. Поперечная жесткость препятствует вертикальным перемещениям продольных стержней и сказывается тем существеннее, чем больше эти перемещения. Этим объясняется тот факт, что в средней части стержней происходит смена знаков в эпюре моментов, в то время как в сечениях 2-2 и 6-6 стержней 2, 3, 4, 5, где перемещения значительно меньше, наблюдается лишь изменение угла наклона касательных к эпюре моментов.

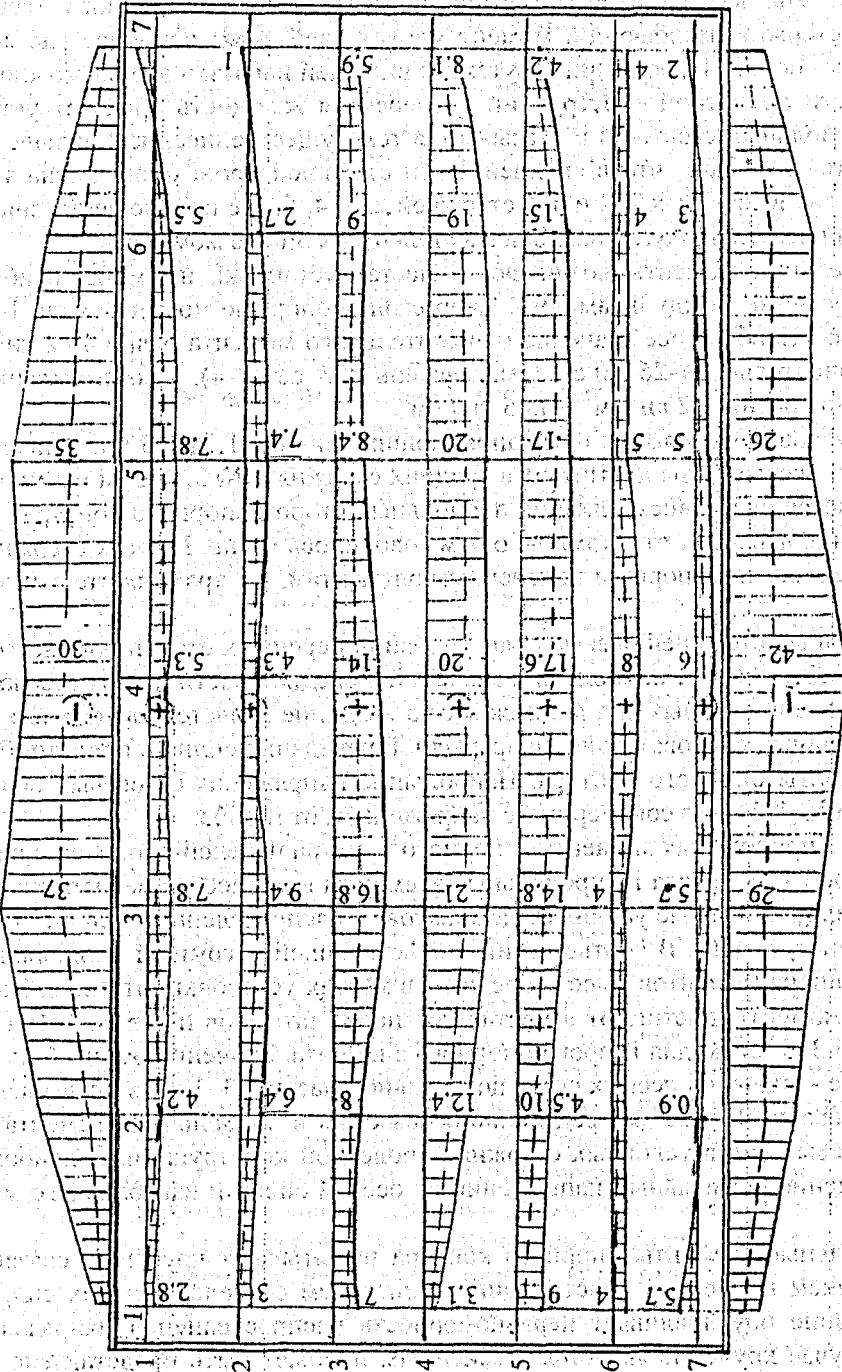
Наибольшие положительные моменты возникают в местах установки штампов, наибольшие отрицательные моменты на участке между штампами. Наибольшие опорные моменты (сеч. 1-1, 7-7) в 3-2 раза меньше пролетных. Наибольшее значение положительного момента равно 40,2 кн·см (см. стержень №4, сеч.3-3), отрицательного - 26 кн·см (см. стержень №5 сеч.4-4). Соответственно наибольшие изгибные напряжения равны 7,2 кн./см<sup>2</sup> и 4,65 кн./см<sup>2</sup>.

Эпюры осевых сил в условных стержнях при напрягающих усилиях 1,75 и 3 кн. приведены на рис. 3. Наибольших значений осевые силы достигают в средних стержнях (№ 3, 4, 5) и наименьших - в крайних (№ 1, 7), что является следствием влияния продольных сторон опорного контура, а также неравномерного распределения давления от штампов, о чем говорилось выше. Во всех стержнях осевые силы убывают от средней части к опорным поперечным элементам, а в крайних стержнях растяжение переходит в сжатие.

Для наиболее напряженных стержней осевые силы вблизи поперечных сторон опорного контура (вблизи опор) составляют 13... 44% от наибольших значений в средней части длины стержня (сеч. 3-3, 4-4, 5-5). Изменение значений осевых сил в стержнях по их длине является следствием работы пролетной конструкции на сдвиг и, следовательно, непрерывной передачи усилий с пролетной конструкции на продольные элементы опорного контура. Наибольшие напряжения от осевых сил равны 6,6 кн./см<sup>2</sup> (сеч. 5-5, стержни № 4, 5), что соизмеримо с напряжением от изгиба.

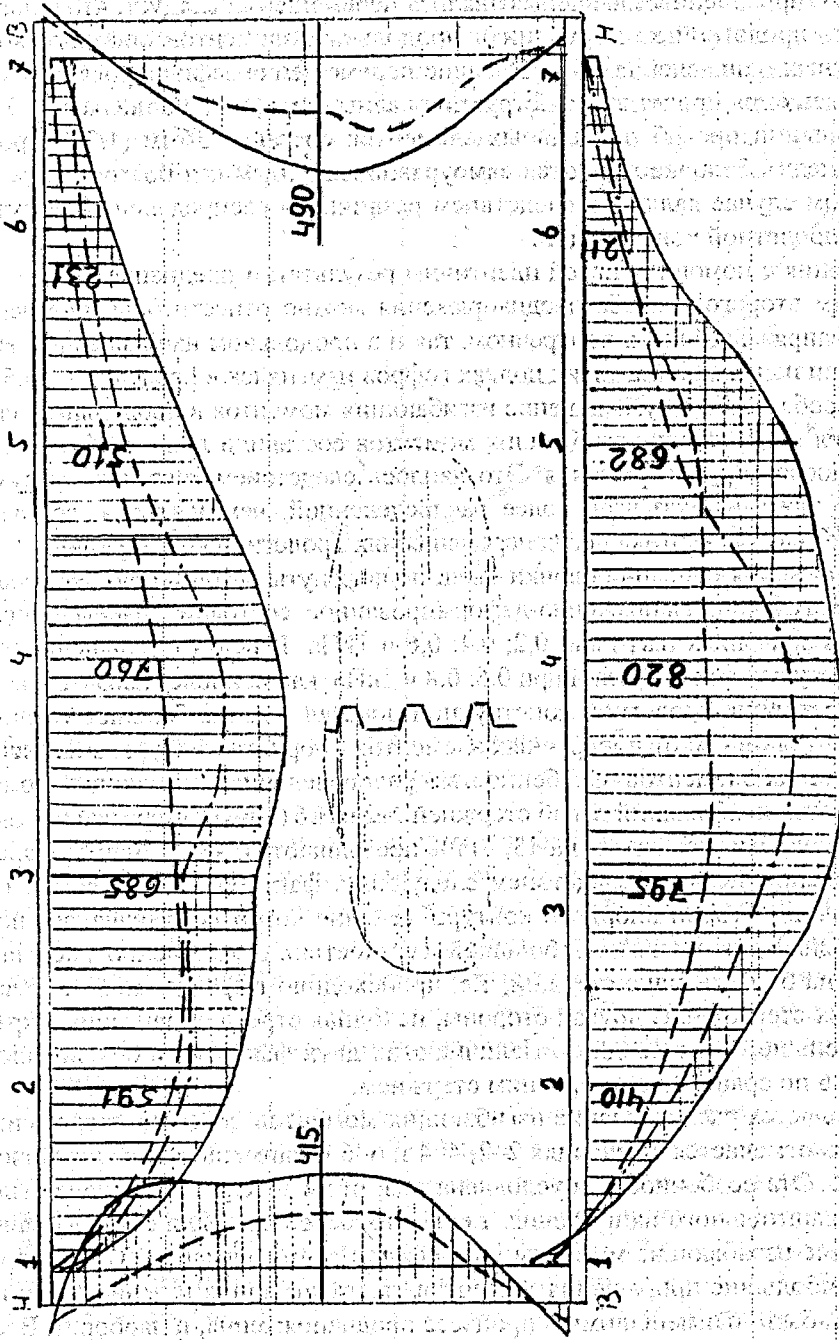
Изгибающие моменты в продольных элементах опорного контура панелей-оболочек приведены на рис. 2, а осевые силы на рис.3. Нагрузка на продольные элементы в процессе преднапряжения состоит из сосредоточенных сил (реактивные усилия от домкратов) и распределенных усилий (реактивные усилия от пролетной конструкции). В соответствии с действующей нагрузкой продольные элементы выгибаются вверх, а эпюра моментов имеет переломы в местах установки штампов. Наибольшего значения изгибающие моменты достигают в местах установки штампов и равны 341 кн·см для одного опорного элемента и 315 кн·см для второго опорного элемента. Значения осевых сил увеличиваются от краев к середине - значения осевых сил в центральной части в 3-10 раз превышают значения тех же сил у краев. Неравномерное распределение осевых сил в продольных элементах соответствует распределению осевых сил в условных стержнях пролетной конструкции. В наиболее нагруженном сечении соотношение нормальных напряжений от осевой силы и изгибающего момента составляют примерно 0,5.

Помимо изгиба, продольные элементы опорного контура испытывают кручения, связанные с внецентренным прикреплением пролетной конструкции и действием сосредоточенных сил, создаваемых домкратами. Кручение обуславливает неравномерность распространения напряжений по ширине полок. В данном случае кручение является стесненным и может быть представлено в виде бимоментов. Наибольшего значения бимомент достигает в сечениях, где были установлены штампы, что является следствием эксцентричного приложения усилий от домкратов. Наибольшее значение изгибающих моментов в плоскости полок равно 17,2 кн·см, что вызывает наибольшие напряжения, равные 4 кн./см<sup>2</sup>. В рядовых панелях-оболочках при их объединении в составе покрытия напряжения, вызванные бимоментом, взаимно погашаются. Усилия в поперечных элементах опорного контура приведены на рис.2. Эпюры изгибающих моментов в горизонтальной плоскости отражают распределение усилий, передаваемых с пролетной конструкции на короткие элементы, эти усилия увеличива



—  $F = 3$  кН; - - -  $F = 1,75$  кН

Рисунок 2 — Эпюры осевых сил в условных стержнях пролетной конструкции и в пролетных элементах опорного контура



— при  $q = 1,0 \text{ кН/м}^2$ ; - - - при  $q = 0,60 \text{ кН/м}^2$ ; - · - · при  $q = 1,0 \text{ кН/м}^2$  с учетом преднапряжения

Рисунок 4 — Эпюры изгибающих моментов в продольных и поперечных элементах опорного контура

ются от краев к середине, поэтому значения моментов увеличиваются к середине более резко, чем при равномерно распределенной нагрузке. Анализ напряженно-деформированного состояния поперечных элементов опорного контура указал на наличие крутящих моментов, что явилось следствием внецентренного приложения вертикальной составляющей опорного давления. При этом было установлено, что скручивание поперечных элементов значительно больше в верхних углах гипара, чем в нижних, что объясняется увеличением угла примыкания пролетной конструкции к этим элементам.

Перемещения пролетной конструкции, а также элементов опорного контура соответствуют эпюрам изгибающих моментов, приведенным выше. Из анализа перемещений следует, что в процессе преднапряжения перемещения пролетной конструкции и продольных элементов опорного контура происходили в противоположных направлениях. Наибольшие перемещения зафиксированы в местах установки штампов; эти перемещения пролетной конструкции равны 44мм, что составляет 1/273 пролета панели-оболочки; наибольший прогиб продольных элементов составил 36мм (1/333 пролета). Усилия преднапряжения в панели-оболочке являются самоуравновешенными, и поэтому перемещения опорного контура в данном случае являются следствием различного распределения нагрузки от напрягающих элементов и от пролетной конструкции.

Результаты преднапряжения с помощью тяжелой идентичны результатам преднапряжения с помощью штампов. К особенностям второго способа преднапряжения можно отнести большую неравномерность распределения преднапряжений как в поперечном, так и в продольном направлениях. Например, коэффициент концентрации напряжений в узких полках гофров изменялся в пределах 3...5,5. Другой особенностью второго способа является уменьшение изгибающих моментов в продольных элементах опорного контура: значения наибольших изгибающих моментов составили лишь 0,75 от наибольших моментов при первом способе преднапряжения. Это явилось следствием того, что нагрузка на опорный контур, создаваемая тяжами, оказалась более распределенной, чем нагрузка, создаваемая штампами при одинаковых наибольших вертикальных перемещениях пролетной конструкции.

После создания преднапряжения панели-оболочки были подвергнуты загрузению вертикальной равномерно распределенной нагрузкой. Напряженно-деформированное состояние панелей-оболочек фиксировалось при следующих значениях нагрузки: 0,2; 0,4; 0,6 и 1кПа. В целях уменьшения объема статьи анализируются только результаты измерений при 0,6; 0,8 и 1кПа, как наиболее характерные.

Анализ напряженного состояния пролетной конструкции показал, что наибольшее увеличение напряжений произошло на расстоянии 2м от поперечных элементов опорного контура, а наименьшее — в местах установки напрягающих элементов. Особенностью распределения изгибающих моментов в пролетной конструкции является наибольший изгиб стержней №2 и №6 (номера стержней указаны на рис.2 и 3), где значения максимальных моментов на 13...17% превышают те же моменты в среднем стержне (№4). Такое распределение является следствием следующих факторов. В результате вертикальных перемещений продольных сторон опорного контура, сечение которых назначалось по предельной гибкости и, следовательно, не отличалось большой жесткостью, существенно уменьшалось их поддерживающее влияние на близлежащие стержни, т.е. происходило выравнивание по несущей способности крайних и средних стержней. С другой стороны, исходная стрела провисания в крайних стержнях была значительно меньше, чем в среднем. Наличие этих двух факторов и обусловило наибольший изгиб в стержнях 2 и 6 по сравнению со средним стержнем.

Другой особенностью является распределение изгибающих моментов по длине стержней: наибольшее приращение моментов отмечается в сечениях 2-2, 4-4 и 6-6 и наименьшее (за исключением опорных) в сечениях 3-3 и 5-5. Эта особенность обусловлена тем, что в сечениях 3-3 и 5-5 были установлены элементы для предварительного напряжения, т.е. в этих сечениях были созданы наибольшие перемещения и наибольшие изгибающие моменты в процессе преднапряжения. Таким образом, можно констатировать, что наибольшие приращения моментов, растягивающих нижние грани профнастила, отмечены там, где они были наименьшими в процессе преднапряжения, и наоборот. Все значения моментов в стержнях положительные. Исключение составляют опорные моменты в некоторых стержнях, однако их значения не существенны и обусловлены случайными факторами. Из сопоставления суммарных эпюр изгибающих моментов (преднапряжение+нагрузка) было получено, что в местах установки напрягающих элементов (штампов, тяжелой) изгибающие моменты под воздействием внешней нагрузки увеличивались, а в средней части (между штампами и тяжами) отрицательные изгибающие моменты уменьшались до нуля и меняли знак.

Наибольшие значения осевых сил так же, как и изгибающих моментов зафиксированы в стержнях N 2 и 6, соответственно 21 и 22 кн, что на 20...23% превышает усилие в среднем стержне

(N 4). Причиной такого распределения осевых усилий, так же как и изгибающих моментов, являются преднапряжение и значительные вертикальные перемещения продольных сторон опорного контура. Знаки осевых сил от преднапряжения и внешней нагрузки совпадают. При этом характер распределения суммарных осевых сил не меняется. Во всех стержнях внешняя нагрузка приводит к увеличению осевых сил, вызванных преднапряжением.

На рис. 4 приведены эпюры изгибающих моментов в продольных элементах опорного контура. Распределение изгибающих моментов вдоль оси продольного элемента соответствует изгибу однопролетной балки от распределенной нагрузки. Распределение осевых сил вдоль продольных элементов опорного контура не претерпевает каких-либо изменений по сравнению с преднапряжением: наименьшие значения продольные силы имеют по краям и наибольшие посередине. Наиболее напряженным сечением является среднее (4-4). Здесь суммарное растяжение в пролетной конструкции составляет 107,2 кн., а суммарное сжатие в продольных элементах опорного контура равно 106 кн. (погрешность составляет 1,1%). В менее напряженных сечениях погрешность увеличивается и достигает 29%.

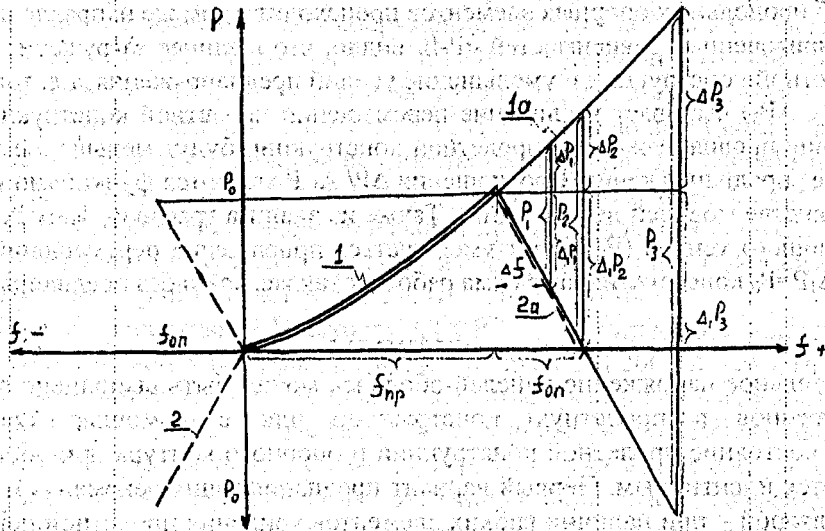


Рисунок 4 – Зависимости "нагрузка–перемещения" ( $P-f$ ) для пролетной конструкции и продольных элементов опорного контура

На рис.4 приведены также значения изгибающих моментов в продольных элементах опорного контура. Предварительное напряжение уменьшает изгиб продольных элементов (на рис.4 уменьшенная часть изгибающих моментов обозначена двойной штриховкой). При этом наибольшее уменьшение отмечается в местах установки напрягающих элементов. Таким образом, с применением преднапряжения панелей-оболочек появляется возможность по уменьшению моментного напряженного состояния в продольных элементах опорного контура. Что же касается осевых сил, то они совпадают по знаку, и поэтому уменьшение сжатия продольных элементов опорного контура за счет преднапряжения не происходит.

Наибольшие перемещения продольных опорных элементов отмечены в середине пролета 14,5 см (с учетом обратного выгиба: 11,2). Анализ вертикальных перемещений показывает, что наиболее существенное уменьшение деформативности пролетной конструкции произошло в местах установки напрягающих элементов (сечения 3-3 и 5-5). При нагрузке  $1 \text{ кн./м}^2$  уменьшение перемещений в сечении 3-3 составило 14...35%, при нагрузке  $\approx 0,8 \text{ кн./м}^2$  – 20...42%, при нагрузке  $0,6 \text{ кн./м}^2$  – 21...53%. В сечении 4-4 (между напрягающими элементами) соответственно: 3...23%; 3...28% и 5...36%. В сечении 5-5 соответственно 12...27%, 16...33%, 22,5...45%. В приведенных интервалах первая цифра относится к точкам, расположенным на расстоянии  $1/4$  ширины пролетной конструкции от продольного элемента, вторая цифра относится к точке, расположенной на середине ширины пролетной конструкции. Исходя из приведенных цифр, можно заключить, что напрягающие элементы следует устанавливать в наиболее деформативных местах, и для повышения эффективности предварительного напряжения следует увеличивать значения вертикальных перемещений, достигаемых в процессе получения преднапряженного состояния.

Работу основных элементов панели-оболочки в процессе преднапряжения и в процессе нагружения внешней нагрузкой можно проиллюстрировать графиками « $P-f$ », представленными на рис.5. В про-



цессе преднапряжения, по мере увеличения усилия в напрягающих элементах (домкратах, тросах) пролетная конструкция прогибается сверху вниз (график 1). В общем случае эта зависимость не является линейной. Одновременно с увеличением напрягающего усилия ( $P_0$ ) происходит выгиб продольных элементов опорного контура, но уже снизу вверх (график 2 показан штриховой линией). Здесь зависимость « $P$ - $f$ » является линейной при вдавливании штампа и квазилинейной при использовании тяжей в качестве напрягающих элементов. Конечные точки обоих графиков имеют одну и ту же отметку по абсолютному значению — усилие в напрягающих элементах ( $P_0$ ). Для удобства дальнейших рассуждений графики 1 и 2 размещены в одном секторе (график для опорного контура обозначен 2а). При появлении внешней нагрузки ( $P_1$ ;  $P_2$ ;  $P_3$ ) и т.д. усилия в пролетной конструкции увеличиваются и происходят перемещения в том же направлении, что и в процессе преднапряжения (график 1а). В продольных элементах опорного контура внешняя нагрузка вызывает перемещения противоположного направления. Соответственно изгибающий момент, вызванный преднапряжением, уменьшается, при каком-то значении внешней нагрузки ( $P_2$ ) становится равным нулю и при дальнейшем увеличении внешней нагрузки изгиб продольных опорных элементов происходит в том же направлении, что и пролетной конструкции. Из приведенных зависимостей « $P$ - $f$ » видно, что внешнее загрузжение вызывает увеличение усилий в пролетной конструкции и уменьшение усилий преднапряжения, т.е. только часть внешней нагрузки ( $\Delta P_1$ ;  $\Delta P_2$ ;  $\Delta P_3$ ) вызывает увеличение перемещений пролетной конструкции ( $\Delta f$ ) и, следовательно, перемещения преднапряженной пролетной конструкции будут меньше, чем при той же внешней нагрузке, но без преднапряжения. Соотношения  $\Delta P / \Delta_1 P$  являются функциями геометрических параметров (при равенстве модулей деформации). Также из анализа графиков 1а и 2а следует, что с увеличением напрягающего усилия ( $P_0$ ) будет уменьшаться приращение перемещений пролетной конструкции ( $\Delta f$ ). При  $\Delta_1 P = P_0$  конструктивная форма работает так же, как и без преднапряжения.

### ВЫВОДЫ

1. Предварительное напряжение панелей-оболочек может быть выполнено по двум вариантам: вдавливанием штампов в пролетную конструкцию или с помощью тяжей. Напряженно-деформированное состояние пролетной конструкции и опорного контура при обоих вариантах преднапряжения является идентичным. Первый вариант преднапряжения рекомендуется при наличии жестких фонарей, второй — при наличии гибких элементов усиления пролетной конструкции. Для получения наибольшей эффективности преднапряжения напрягающие элементы следует располагать в наиболее деформативных местах.
2. Преднапряжение существенно уменьшает деформативность пролетной конструкции при действии внешней нагрузки, при этом наибольшее снижение перемещений отмечается в местах установки напрягающих элементов. Уменьшение деформативности пролетной конструкции имеет прямую зависимость от значений напрягающих сил: с увеличением преднапряжения уменьшаются приращения перемещений пролетной конструкции при одинаковых внешних нагрузках.
3. Преднапряжение не оказывает существенного влияния на значения осевых сил в пролетной конструкции и в продольных элементах опорного контура, если перемещения пролетной конструкции, обусловленные предварительным напряжением, не превышают перемещений, вызванных внешней нагрузкой. Предварительное напряжение оказывает существенное влияние на значения изгибающих моментов в продольных элементах опорного контура и предоставляет возможность по их значительному уменьшению.