

Драган А.В.

О ВЫБОРЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

Введение. Основополагающая идея железобетона как комплексного строительного материала заключается в максимально полном использовании положительных свойств составляющих его компонентов: арматура используется для восприятия главным образом растягивающих усилий, бетон – сжимающих. Реализуется эта идея только лишь при условии, когда оба материала находятся в непосредственном контакте и могут совместно воспринимать усилия от внешних воздействий. Помимо всего выше сказанного, сцепление арматуры с бетоном предопределяет характер трещинообразования – величину раскрытия трещин и шаг между ними, оказывает влияние на работу арматуры и бетона на участках между трещинами и тем самым влияет на деформативность и работоспособность конструкции в целом.

Совместная работа арматуры и бетона становится возможной благодаря выполнению следующих условий:

- сопоставимости значений коэффициентов линейного расширения;
- идентичности, в известных границах, деформаций двух материалов по границе их контакта при действии усилий от внешних нагрузок;
- соблюдения требований как по количеству (т.е. соблюдение условия по выдерживанию минимальных коэффициентов армирования сечений), так и по правильному размещению арматурных стержней в сечении.

Силы сцепления, благодаря которым осуществляется совместная работа арматуры и бетона, являются результатом трех основных факторов:

- молекулярного взаимодействия или химической адгезии;
- трения по поверхности контакта стали и бетона;
- механического зацепления выступов арматуры в бетоне.

Силы молекулярного взаимодействия (химическая адгезия) являются следствием склеивания цементного камня с арматурой в период схватывания и твердения бетона. Их величина обусловлена развитием химических и физических процессов, которые приводят к возникновению на контактной поверхности капиллярных и молекулярных сил притяжения. Силы адгезии действуют только до тех пор, пока между арма-

турой и бетоном нет взаимных смещений. Уже при начальном смещении стержня относительно бетона молекулярное взаимодействие нарушается, поэтому данный компонент не оказывает решающего значения на величину сцепления. Следует отметить, что определить численное значение данного компонента достаточно трудно.

Если силы химической адгезии действуют до тех, пока не возникают взаимные смещения арматуры и бетона, то силы трения по поверхности обоих материалов и механическое зацепление выступов арматуры с бетоном мобилизуются только после возникновения этих смещений. Величина сил трения определяется качеством взаимодействующих поверхностей (рис. 1), а также величиной поперечного обжатия бетоном арматуры, которое происходит при усадке (поперечной) бетона. Вклад сил трения составляет примерно 15-20% от общего сопротивления сцеплению.

Механическое зацепление является определяющим фактором в сцеплении арматуры с бетоном и составляет примерно 75% от общего сопротивления скольжению арматуры в бетоне. Это объясняет, что характеристики сцепления с профилированной арматурной стали лучше по сравнению с арматурой, имеющей гладкую поверхность.

Механизм зацепления арматуры с бетоном характеризуется достаточно сложным напряженно-деформированным состоянием. Упругая стадия передачи напряжений сцепления обусловлена в основном упругой работой бетона под воздействием сжимающих усилий, передаваемых поперечными выступами арматуры. Возникновение больших напряжений сжатия в условиях стесненных деформаций приводит к нарушению структуры бетона под выступами и развитию пластических деформаций, что приводит к возникновению внутренних трещин, которые развиваются по траекториям главных сжимающих напряжений (рис. 2,а). Сложная картина перераспределения усилий между арматурой и бетоном достаточно хорошо описывается посредством следующего механизма: силы сцепления передаются от выступов арматуры на окружающий бетон в форме сжатых конусов, продольные составляющие которых представляются растягивающими (сжимающими)



Рис. 1. Характеристики шероховатости поверхности гладких арматурных сталей (результаты ультразвуковых исследований) [11]

Драган Алексей Вячеславович, аспирант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.
Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

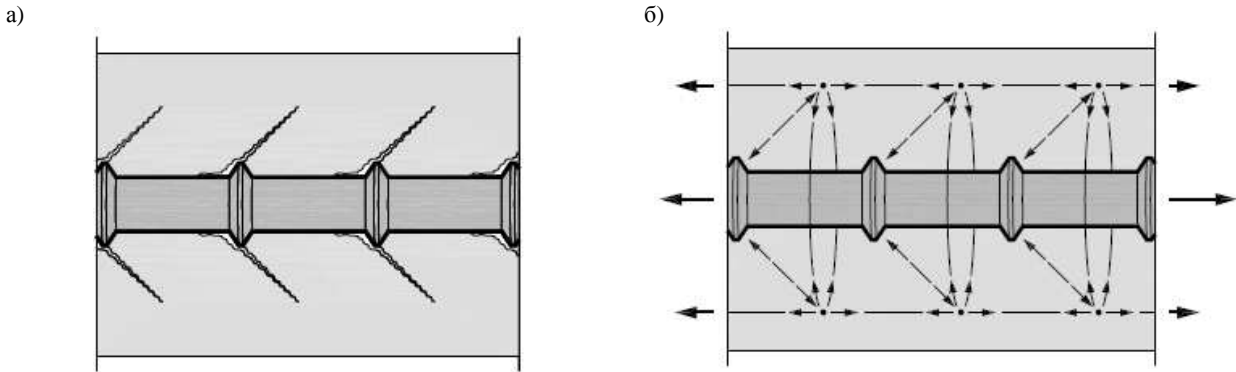


Рис. 2. Сцепления арматуры с бетоном [13]: а) развитие наклонных трещин; б) механизм перераспределения усилий между арматурой и бетоном

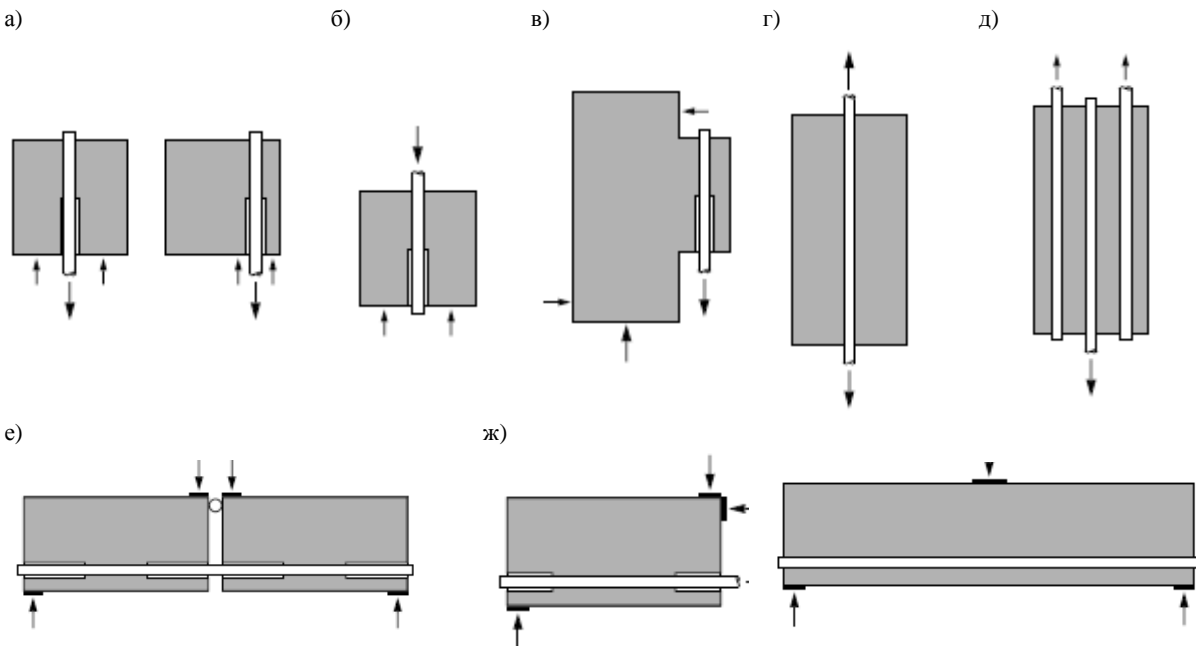


Рис. 3. Основные виды экспериментальных образцов и схем испытаний при исследовании сцепления арматуры с бетоном [10]: а) выдергивание арматурного стержня; б) вдавливание арматурного стержня; в) консольный образец с вытягиваемым арматурным стержнем; г) растягиваемый образец с одним арматурным стержнем; д) образец с 3-мя с вытягиваемыми арматурными стержнями; е) изгибаемый образец; ж) балочный образец

силами, действующими вдоль арматурного стержня. Радиальные составляющие сил сцепления находятся в равновесии с поперечными растягивающими силами, действующими в основании сжатого конуса (рис. 2,б).

Анализ методик исследования сцепления арматуры с бетоном. Изучению сцепления арматуры с бетоном посвящено большое количество исследований и работ как отечественных [1, 3, 4, 6, 7 и др.], так и зарубежных ученых [8, 9-11, 13], начиная с первой половины XX века. К настоящему времени разработаны методики по изучению законов сцепления, которые позволяют не только учесть конструктивно-технологические параметры, но и моделировать взаимодействие арматуры с бетоном в различных конструктивных узлах и элементах (рис. 3). Из всего многообразия методов наибольшее применение получили испытания, при которых производится выдергивание арматуры из бетонного элемента (*pull-out-test*). Это объясняется как относительной простотой экспериментальных образцов, так и отсутствием норм на данный вид испытаний (последнее относится в первую очередь к отечественной нормативной базе). При этом большинство исследователей берет за основу методику, рекомендованную [12]. Согласно рекомендациям [12] испытания проводятся

путем выдергивания арматурных стержней (\varnothing_s) из бетонных образцов (кубов или цилиндров) высотой $h \geq 10\varnothing_s$. Арматурный стержень заделывается на всю длину бетонного образца, при этом ненагруженный конец арматуры должен выходить за пределы бетонной части не менее чем на 10мм. В пределах бетонного образца арматурный стержень имеет участок сцепления с бетоном длиной $l \geq 5\varnothing_s$, а также участок без сцепления длиной также не менее $5\varnothing_s$.

Однозначно успешной данную методику испытаний назвать нельзя. Методика привлекательна, главным образом, простотой конструкции экспериментальных образцов и применяемого оборудования. К отрицательным сторонам можно отнести следующие моменты. Во-первых, возникновение контактных напряжений на границе «образец – опорная плита», из-за чего наступление предельного состояния может произойти от смятия бетонной призмы в области опирания, а не от исчерпания сцепления арматуры и выдергивания арматурного стержня. Данное замечание относится в первую очередь для случаев, имеющих место при значительной длине участка эффективного сцепления. Некоторые исследователи пытаются устранить данный недостаток путем установки между опорной плитой и бетонным образцом антифрикцион-

ной прокладки. Во-вторых, к недостатку методики можно отнести и тот факт, что результаты испытаний по предложенной схеме имеют некоторое завышение значений сопротивления сдвигу, вследствие стесненного раскрытия трещин. Погрешность особенно велика, если сцепление арматуры с бетоном сохраняется не по всей длине бетонной части образца. На этот недостаток впервые было указано в работе [7]. И, наконец, к наиболее существенному недостатку, по нашему мнению, данной схемы испытаний можно отнести тот факт, что в большинстве известных работ [1, 3, 6 и др.] о величине напряжений (деформаций) арматуры на участках эффективного сцепления судят только лишь по деформациям незагруженного конца. Поэтому авторы сознательно идут на упрощение реальной картины напряженного состояния, возникающей в зоне контакта «арматура-бетон», и предполагают, что напряжения распределяются равномерно как по периметру стержня, так и по его длине, оперируя при этом некоторыми усредненными по длине заделки стержня значениями напряжений сцепления (рис.4). Однако при решении ряда практических задач более значимым является знание характера распределения напряжений сцепления и их предельных значений (например, на участках между трещинами).

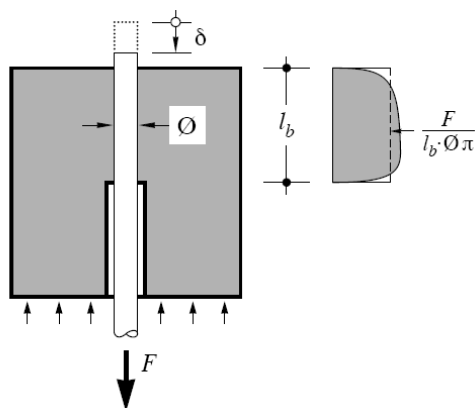


Рис. 4. Определение напряжений сцепления при выдергивании арматурного стержня из бетонного куба [10]

Впервые указанный выше недостаток был установлен Рэмом (*Rehm*) еще 60-70 годы XX века [11]. Для его устранения, и для того, чтобы получить действительную зависимость «напряжения сцепления – перемещения», Рэм попытался выделить «минимальный элемент сцепления» [11]. Рэм подверг традиционную методику некоторому усовершенствованию. Эксперимент производился по-прежнему на вытягивание арматуры (гладкой и профилированной) из бетонного куба, однако длина заделки стержней была значительно меньше, чем в предыдущих экспериментах (рис. 5). Длина контакта арматуры с бетоном была соизмерима с расстоянием между поперечными ребрами профилированных стержней или с диаметром – для гладкой арматурной стали. При этом, в исследованиях в качестве профилированной арматуры использовались стержни, выполненные автором самостоятельно из круглых стержней с различной геометрией выступов.

Рэм в своих исследованиях исходил из того, что найденная им закономерность должна являться основополагающей для объяснения механизма сцепления. Использование в экспериментах стержней с небольшой длиной участка контакта с бетоном позволяет, по мнению Рэма, посредством решения дифференциальных уравнений получить распределение напряжений в арматуре, а также напряжений сцепления по любой длине заделки арматурного стержня.

На основании результатов проведенных экспериментов Рэмом была предложена зависимость между напряжениями сцепления и смещениями арматуры [11]:

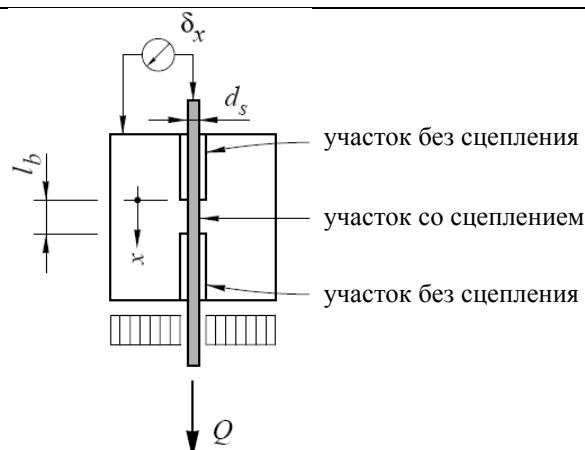


Рис. 5. Принципиальная схема испытаний согласно Рэму [11]

$$T = \frac{\tau_{bx}}{f_{c,cube}}, \quad T = \frac{a_s}{c_s} (A \cdot \delta_x^B + C \cdot \delta_x); \quad (1)$$

где a_s – высота поперечных ребер, мм;

c_s – расстояние между поперечными ребрами, мм;

δ_x – перемещения арматуры вдоль оси x , мм (см.рис.5);

A, B и C – безразмерные эмпирические коэффициенты, экспериментально определяемые для каждого вида профиля и типа арматурной стали;

T – относительные напряжения сцепления;

$f_{c,cube}$ – кубиковая прочность бетона на сжатие, МПа;

τ_{bx} – средние напряжения сцепления, МПа.

К более прогрессивным и значительно более информативным методикам исследования сцепления арматурного стержня с бетоном относятся исследования с применением тензометрических [2, 4, 9] и оптоволоконных измерений [8]. Использование данных методов позволят разрешить самую большую сложность при исследовании характеристик сцепления, обусловленную невозможностью измерений деформаций арматуры по длине сцепления без, хотя бы частичного, нарушения контакта по поверхности двух материалов. Данные методики позволяют свести нарушение реальных условий сцепления к минимуму.

При использовании тензометрических измерений измерительная часть системы, а именно тензометрические датчики, интегрируются непосредственно в арматурный стержень, что дает возможность получать при испытаниях образцов реальную картину деформирования стержня. Существует несколько вариантов расположения тензорезисторов по сечению арматурных стержней (рис. 6).

Определение деформаций арматурных стержней по длине эффективного сцепления с использованием тензометрических измерений успешно применено в исследованиях [9]. В [9] автором предложена методика получения распределения напряжений сцепления посредством испытания образцов (см. рис.3.г) на центральное растяжение. Размеры сечения бетонной части образца предложено принимать равными минимальному расстоянию между трещинами в растянутых элементах. При выборе размеров образцов с учетом принятого допущения, данная схема испытаний позволяет моделировать работу элемента железобетонной конструкции, выделенного двумя трещинами нормальными к оси элемента. Эксперименты производились с использованием гладкой арматуры Ø28мм и горячекатаной арматуры периодического профиля Ø28мм. Оснащение арматурных стержней тензорезисторами

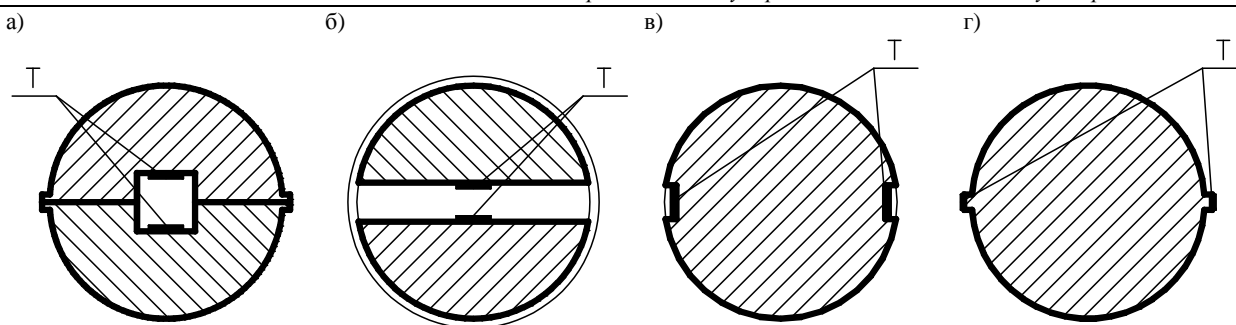


Рис. 6. Схемы расположения тензорезисторов по сечению [4]: а), б) расположение тензорезисторов внутри стержня; в), г) – на поверхности стержня (Т – тензометрический датчик)

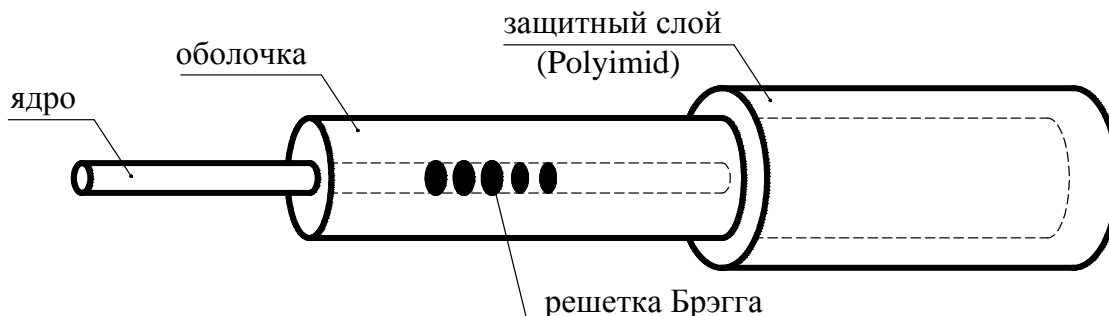


Рис. 7. Оптоволоконный сенсор [8]

производилось по схеме рис.6,а. При проведении испытаний к образцам прикладывалась возрастающая растягивающая нагрузка, при этом на каждом этапе регистрировались показания тензорезисторов. Максимум нагрузки соответствует максимальному рабочему напряжению применяемой в эксперименте арматурной стали. На основании проведения эксперимента автором методики были предложены эмпирические зависимости для определения напряжений сцепления для различных типов арматуры:

- для гладкой арматуры [9]: $f_b = (41,7 - 0,2 f_s) \Delta^{0,8}$; (2)

- для арматуры серповидного профиля [9]: $f_b = (35 - 0,3x) \Delta^{0,5}$; (3)

где f_b – напряжения сцепления (Н/мм²);

f_s – напряжения стали (Н/мм²);

Δ – перемещения (мм);

x – расстояние от центра (анкерной точки) (мм);

Применение тензометрических измерений для определения деформаций арматурного стержня по длине контакта с бетоном имеет, как и любой другой метод, свои положительные и отрицательные стороны. К отрицательным сторонам данного метода можно отнести следующие:

1. Сложность изготовления арматурных стержней (фрезеровка арматурных стержней, пропил пазов, работы по обеспечению герметичности паза после сборки стержней).
2. Невозможность использования большого количества тензорезисторов, так как при конструировании стержня необходимо предусмотреть расположение и вывод проводов от каждого тензорезистора. Как правило, вывод проводов производится через пазы или через отверстия, что уменьшает поперечное сечение арматуры.

К положительным сторонам данного метода относят:

1. Возможность использования тензометрических измерений в исследованиях с различными видами экспериментальных образцов.

2. Результатом измерений является непосредственно картина деформирования арматурного стержня внутри бетона, максимально приближенная к реальной.
3. Данная методика позволяет учесть при исследовании практически все конструктивно-технологические факторы, влияющие на механизм сцепления.

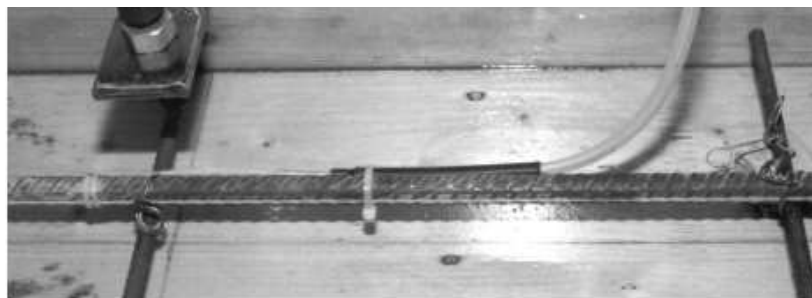
В настоящее время наблюдается бурное развитие оптоволоконных технологий, в частности оптоэлектроники, что имеет следствием широкое распространение оптоволоконной измерительной техники во все области науки. Уже разработаны оптоволоконные сенсоры для измерения практически всех физических величин (температура, давление, деформации, ускорение, сила тока, показатель преломления и др.).

В представленных в [8] исследованиях была реализована попытка применения оптоволоконных сенсоров для изучения влияния различных параметров (диаметр арматуры, коэффициент армирования, прочность бетона, преднапряжение) на деформативность изгибаемых элементов и характер трещинообразования (в частности шаг распределения трещин нормальных к продольной оси).

Оптоволоконный сенсор состоит из ядра, оболочки и защитного слоя (рис.7). Оболочка из кварцевого стекла служит для минимизации потерь и механической стабильности волокна. Благодаря обогащению ядра германием (Germanium), его оптический индекс преломления по отношению к ядру повышается. Из-за полного отражения между ядром и оболочкой световая волна распространяется вдоль волокна.

Физический принцип работы оптоволоконных сенсоров заключается в изменения длины световой волны, пропускаемой через волокно. Эти изменения регистрируются при помощи различных спектроскопических методов. Изменение длины световой волны происходит вследствие прохождения ее через решетку Брэгга. Решетка Брэгга представляет собой оптический частотный фильтр, интегрированный в ядро волокна, отражающий и изменяющий направление световых волн определенной длины. Создание структуры решетки осуществляется непосредственно в ядре оптического волокна

а)



б)

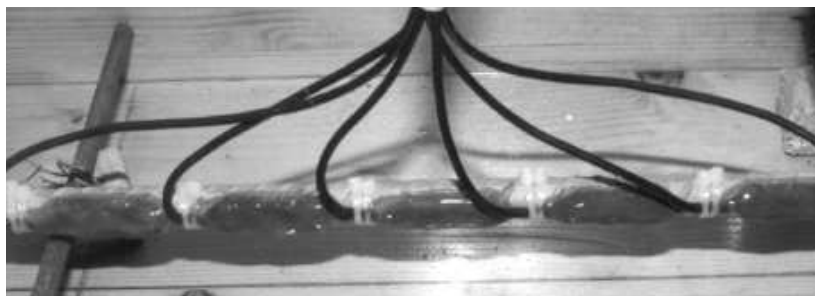


Рис. 8. Оснащение арматурного стержня измерительными элементами [8]: а) оптоволоконный сенсор; б) тензометрические резисторы

путем облучения его отрезка ультрафиолетовым источником света через специальную маску (структуру с периодически изменяющимся коэффициентом пропускания). Таким образом, при прохождении света, с длиной волны равной длине волны Брэгга, происходит ее интерференция на многочисленных элементах решетки. Как следствие, в спектре световых длин волн проявляется характерные максимумы, которые при трансмиссионных измерениях характеризуются уменьшением, а при измерениях в отраженном свете – увеличением интенсивности света. В основу использования оптоволоконных сенсоров для измерения деформаций положена линейная зависимость между внешними воздействиями на волокно (деформации $\Delta\varepsilon$ и температура ΔT) и результирующим изменением длины волны $\Delta\lambda_B$ [8]:

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{1 - p_e} \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \right), \quad (4)$$

где $\alpha = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{K}$ – коэффициент термоэластичности;

$p_e = 0,21$ – эффективный коэффициент оптикоэластичности;

$\xi = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{K}$ – оптикотермический коэффициент.

Ввиду ограниченного количества информации об использовании оптоволоконных сенсоров для регистрации деформаций арматуры в зоне контакта с бетоном и о результатах подобных исследований, достаточно трудно говорить об отрицательных и положительных аспектах их применения. Как правило, плюсы и минусы любого метода проявляются только при его многолетнем использовании. Данная методика еще достаточно нова. К отрицательной моментам, по нашему мнению, можно отнести достаточно высокую сложность и стоимость как оборудования, так и самих оптоволоконных сенсоров. Положительные стороны применения подобной методики очевидны:

1. Незначительные размеры волокон (диаметр волокна 125 μm). При интегрировании оптоволоконного сенсора в арматуру достаточно выполнить паз размером 1,0мм×1,0мм. Подобного рода ослабление сечения не оказывает существенного влияния на деформативно-прочностные характеристики стержня.
2. Значительно сокращаются расходы на соединение волокон с регистрирующей аппаратурой. В случае использова-

ния оптоволоконных сенсоров не требуется подвод питания к точке, где производится регистрация деформаций (рис. 8). Длина проводов не оказывает влияния на результат измерений.

3. Оптический сигнал может передаваться без усиления и помех со стороны электромагнитных полей на значительные расстояния от измерительного прибора.
4. Измерения с использованием оптоволоконных сенсоров дает возможность получить реальные значения деформаций и напряжений арматуры в зоне контакта с бетоном.

Заключение. Из всего многообразия представленных выше методик и схем испытаний, по нашему мнению, наиболее пригодной, несмотря на указанные ее недостатки, все же является методика с использованием тензометрических резисторов. Она характеризуется относительно небольшими расходами на изготовление экспериментальных образцов и достаточно однозначными результатами исследований. В настоящее время автором статьи ведется работа по подготовке эксперимента по исследованию напряженно-деформированного состояния в зоне контакта арматуры с бетоном с применением тензометрических измерений для регистрации деформаций арматуры в бетоне. В качестве экспериментальных образцов выбраны центрально армированные бетонные цилиндрические образцы диаметром 200мм и высотой $h \geq S_{\text{гм}}$ ($S_{\text{гм}}$ – среднее расстояние между трещинами нормальными к продольной оси в изгибаемых и растянутых элементах [5]). Каждый стержень оборудуется 41 тензорезистором с шагом 25мм по схеме рис.6,а. Для измерения деформаций планируется использовать компьютерную измерительную систему «ТИС-СА», которая позволяет одновременно регистрировать показания по 64 тензорезисторам с частотой дискретизации сигнала 10Гц. В планируемых экспериментах поставлена задача изучить влияние типа поверхности арматурной стали, положения стержня в сечении, прочности бетона и ряда других факторов на величину сцепления арматуры с бетоном, а также выявить закономерности формирования трещин нормального отрыва по длине бетонного образца.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бенин А.В. Экспериментальные исследования по определению сил сцепления арматуры с бетоном // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2006. – №9.

2. Драган А.В. Исследование совместной работы ненапрягаемой арматуры серповидного профиля с бетоном при статическом нагружении // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. Сборник статей XIV Международного научно-практического семинара – том 2 – Минск, 2006 – с.122-128.
3. Иващенко Ю.А., Оатул А.А. Методика исследования ползучести сцепления арматуры с бетоном // Сборник научных трудов челябинского политехнического института. Железобетонные конструкции. Выпуск III. – Челябинск, 1963 – с.65-73.
4. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. – М.: Стойиздат, 1974. – 232 с.
5. СНБ 5.03.01-02 «Конструкции бетонные и железобетонные». – Мн.: Стройтехнорм, 2002 г. – 274с.
6. Терин В.Д., Хотько А.А. Анкерующая способность арматуры различных профилей // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений. Сборник научных трудов инженерно-строительного факультета полоцкого государственного университета. – вып. I – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – с.344 – 350.
7. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. – М.: Стройиздат, 1981. – 184с.
8. Albin Kenel, Peter Marti. Faseroptische Dehnungsmessungen an einbetonierten Bewehrungstäben. – Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2001. – 97s.
9. Charles. K. Kankam. Relationship of Bond Stress, Steel Stress, and Slip in Reinforced Concrete // Journal of Structural Engineering. – 1997. – V.123 – p.79-85.
10. Manuel Alvarez. Einfluss des Verbundverhaltens auf das Verformungsvermögen von Stahlbeton. – Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1998. – 189s.
11. Marcus Schenkel. Zum Verbundverhalten von Bewehrung bei kleiner Betondeckung. – Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1998. – 167s.
12. RILEM/CEB/FIP Recommendation on reinforcement steel for reinforced concrete. RC6. Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test. 1983.
13. Tomaž Ulaga. Betonbauteile mit Stab- und Lamellenbewehrung: Verbund- und Zuggliedmodellierung.: Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der Technischen Wissenschaften. – Zürich, 2003. – 169s.

Статья поступила в редакцию 17.01.07

УДК 624.014.001.24 (476.7)

Драган В.И., Люстибер В.В.

НАТУРНОЕ ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРНОЙ ПЛИТЫ ПОКРЫТИЯ ЛЕДОВОЙ АРЕНЫ В Г. ПРУЖАНЫ

Введение

Испытание металлической структурной плиты покрытия ледовой арены в г. Пружаны проведено с целью:

- определения реальной работы и возможности нормальной эксплуатации конструкций покрытия;
- выявления действительного напряженно – деформированного состояния элементов покрытия под нагрузкой, определения запасов несущей способности при нагружении полной нормативной нагрузкой;
- проверки качества монтажа структурной плиты покрытия.

1. Конструктивные решения покрытия ледовой арены в г. Пружаны

Несущая конструкция покрытия ледовой арены на 800 мест в г. Пружаны представляет собой металлическую простран-

ственную перекрёстно-стержневую конструкцию, выполненную в виде предварительно напряжённой прямоугольной плиты, ломаной в середине меньшего пролёта. Регулярная пространственная конструкция образована двумя прямоугольными плитами, соединёнными в коньке и создающими два ската с уклонами 8°. Структурная плита опирается по контуру крайними узлами нижнего пояса на сталежелезобетонные колонны, расположенные с шагом 6 м и 3 м и образующие в плане прямоугольник с размерами сторон 39 м и 63 м.

В связи с необходимостью восприятия реакции распора, в уровне опорных узлов нижнего пояса плиты устанавливаются затяжки с шагом 3м в направлении параллельном меньшему пролёту. Затяжки располагаются с пятого узла нижней поясной сетки структуры при начале отсчёта в торцах плиты.

Структурная плита образована пересечением двух наклонных плоских ферм, и может рассматриваться как кон-

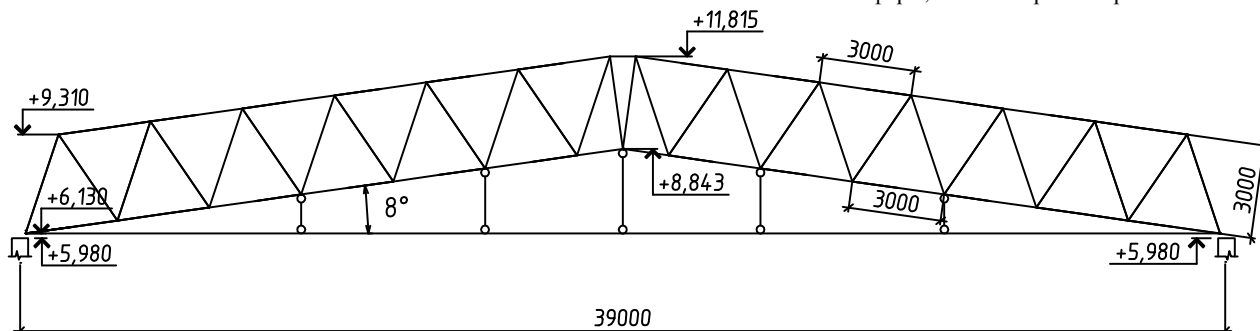


Рис. 1. Поперечный разрез структурной плиты покрытия ледовой арены в г. Пружаны

Драган Вячеслав Игнатьевич, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций, первый проректор Брестского государственного технического университета.

Люстибер Вадим Викторович, аспирант кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.