

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ Т-ОБРАЗНЫХ УЗЛОВ ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ, УСИЛЕННЫХ НАПРЯГАЮЩИМ БЕТОНОМ

Благодаря целому ряду достоинств (пониженная металлоемкость и трудоемкость, технологичность, эстетичность) конструкции из стальных прямоугольных труб находят должное применение в строительстве. Отмечается также перспектива использования в подобных конструкциях элементов из замкнутых полых профилей, заполненных бетоном. Использование подобных элементов в конструкциях обусловлено их повышенной прочностью и жесткостью, а также благодаря присущей им коррозионной стойкостью, пожаростойкостью. Однако внедрение таких конструкций ограничено.

Недостаток экспериментальных исследований данных конструкций, не достаточная продуманность технологических решений (обеспечение плотного заполнения полости трубы бетоном и исключение образование полостей между оболочкой и бетонным ядром на ранних этапах работы трубобетонных элементов), отсутствие приемлемых методов расчета – является основным сдерживающим фактором.

Так отсутствие учета деформативности узлов при расчете систем искажает реальную картину действующих усилий в элементах конструкций и приводит к ошибкам на ранних этапах проектирования. Жесткость узлов меняется в процессе нагружения конструкции, поэтому происходит постоянное перераспределение усилий, а это сказывается на устойчивости элементов и деформативности системы в целом. Вопрос деформативности узлов весьма актуален как для полых, так и для усиленных бетоном узлов, поскольку действующие нормы не принимают во внимание данное явление [1]. Сложность учета деформативности состоит, прежде всего, в потребности математического описания законов изменения жесткости и необходимости задействовать при расчете итерационные процессы (в силу нелинейности законов изменения жесткости). Решение данной проблемы в привлечении при ведении расчетов возможностей программных комплексов позволяющих учесть физическую нелинейность материала (к примеру «МИРАЖ»).

В действующих нормативных материалах отсутствуют инженерные зависимости для расчета полых узлов и узлов с усиленной бетоном стойкой с  $0,9 < \beta \leq 1$  (где  $\beta = \frac{b_1}{b_0}$ ,  $b_1$ ,

$b_0$  – соответственно ширина ригеля и стойки), а также и для узлов усиленных бетоном с  $\beta \leq 0,9$ . Для обычных бетонов из-за усадки бетона во времени и в процессе работы самого элемента, вследствие разницы коэффициентов Пуассона бетона и стали, возможно образование полости между металлической оболочкой трубы и бетонным ядром, таким образом утрачивается трехосное напряженное состояние бетона – «эффект обоймы» [2]. Применение бетонов на напрягающих цементах позволяет обеспечить совместность работы металлической оболочки и бетонного ядра [3], а также дает возможность уменьшить деформативность и повысить прочность узлов [4]. Для исследования целесообразности усиления стальных труб бетоном на напрягающем цементе была испытана серия из 17 Т-образных узлов с  $0,6 \leq \beta \leq 1$ . Серия из 12 узлов с  $\beta \leq 0,9$

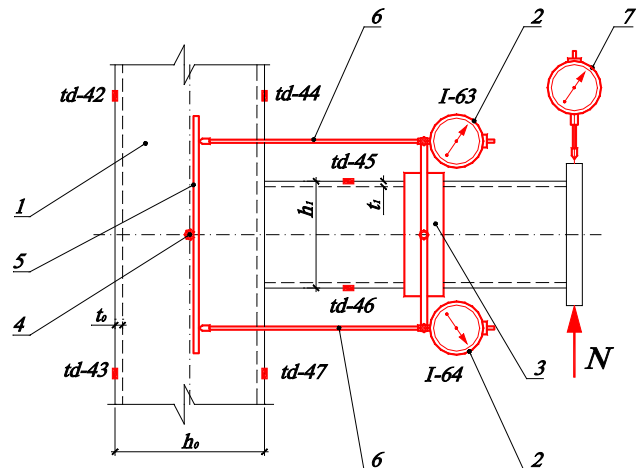


Рис. 1. Схема расстановки измерительных приборов для измерения угла поворота

1 – исследуемый узел; 2 – индикаторы часового типа; 3 – рамка с креплениями для индикаторов; 4 – стальной штыврь; 5 – стальная пластина; 6 – насадки на индикаторы; 7 – индикатор часового типа

была испытана в лаборатории белостокской политехники. Из данной серии 2 узла были испытаны полыми и 10 узлов с заполнением стойки бетоном на напрягающем цементе. В лаборатории брестского государственного технического университета были проведены испытания 5 узлов с  $\beta = 1$ , из которых 2 узла были испытаны полыми и 3 со стойками усиленными бетоном. Узлы полые и со стойками, заполненными бетоном, испытывались на действие изгибающего момента. Экспериментальный угол поворота фиксировался при помощи индикаторов часового типа (рис.1), изменения в напряженно-деформированном состоянии отслеживались при помощи тензорезисторов. Кроме того, для узлов с параметром  $\beta \leq 0,9$  при помощи индикаторов были зафиксированы изменения диагоналей стенки стойки на уровне поясов ригеля (рис.2), дополнительно на стенке стойки были установлены розетки из тензодатчиков (рис.3).

Экспериментальные исследования показали, что характер работы Т-образных узлов из стальных прямоугольных труб с  $0,9 < \beta \leq 1$  и податливых с  $\beta \leq 0,9$ , как полых, так и со стойкой заполненной бетоном существенно отличается. Так для полых узлов с параметром  $\beta \leq 0,9$  в основном поворот осуществляется за счет деформаций стенки стойки, к которой примыкает ригель. Причем ось поворота проходит практически на уровне середины стенки ригеля. Под растянутой полкой ригеля происходит выпучивание полки стойки, а под сжатой наоборот – вдавливание полки. В ригеле работают в большей степени стенки. Разрушение полых узлов происходит за счет местной потери устойчивости полки стойки. Для узлов усиленных бетоном с  $\beta \leq 0,9$  поворот происходит также за счет деформаций стенки стойки. Однако, поворот осуществляется в данном случае относительно сжатой полки ригеля.

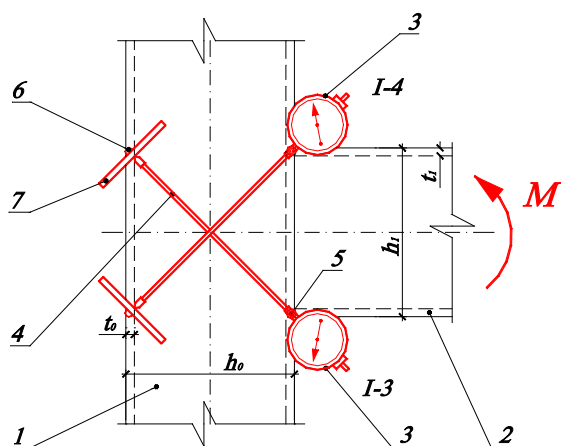


Рисунок 2. Схема расстановки диагональных индикаторов

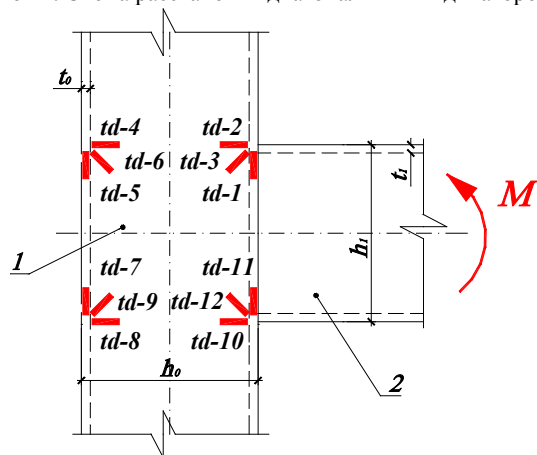


Рисунок 3. Схема расстановки тензорезисторов в узлах с  $\beta \approx 1$   
 1 – стойка узла; 2 – ригель; 3 – индикатор часового типа; 4 – насадки на индикаторы; 5 – крепления для индикаторов; 6 – стальной штырь; 7 – стальная пластина

Для визуальной оценки работы бетона бетонное ядро при помощи фрезы было освобождено от стальной оболочки. Бетон играет поддерживающую роль для стойки и работает на смятие под сжатой полкой ригеля. В растянутой зоне стойки бетон не претерпел каких-либо видимых изменений. В ригеле следует отметить, помимо отмеченной ранее для полых узлов работы стенок, активное включение в работу сжатого пояса ригеля. Разрушение происходит по границе сплавления ригеля со стойкой (рис. 4).

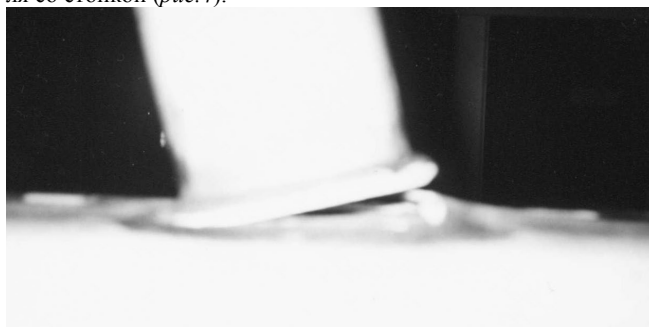


Рисунок 4. Узел PB-5 (усиленный бетоном,  $\beta \leq 0,9$ ) после разрушения

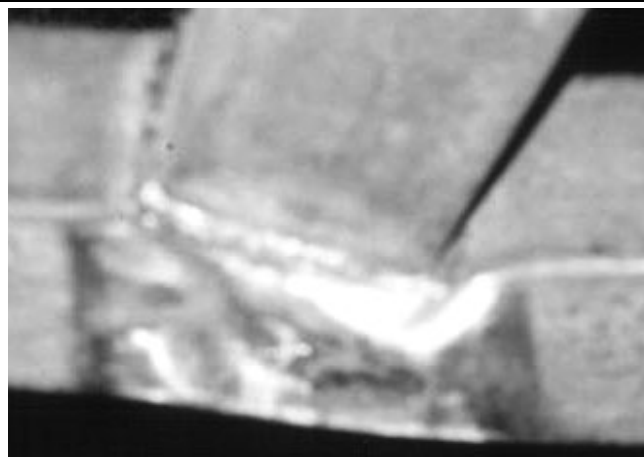


Рисунок 5. Узел PB-14 (полый,  $\beta \approx 1$ ) после разрушения



Рисунок 6. Узел PB-16 (усиленный бетоном,  $\beta \approx 1$ ) после разрушения

Принципиально отличается работа узлов с  $\beta \approx 1$ , поскольку в работе активно задействованы стенки стойки, в отличие от узлов с  $\beta \leq 0,9$ , где активно работал пояс. Для полых узлов с параметром  $\beta \approx 1$  поворот ригеля происходит за счет изгиба полок стойки и деформации стенок. Ось поворота ригеля незначительно смещена в сторону сжатого пояса. Разрушение полых узлов происходит за счет потери местной устойчивости стенок стойки под сжатым поясом ригеля (разрушение основной конструкции) (рис. 5). В узлах усиленных бетоном поворот ригеля осуществляется как за счет деформации стенок и полки стойки в области стыка, так и за счет интенсивных деформаций в самом ригеле. Ось поворота ригеля также несколько смещена в сторону сжатого пояса. Для узлов усиленных бетоном с параметром  $\beta \approx 1$  разрушение происходит за счет потери устойчивости сжатого пояса ригеля, и разрушения металла по границе сплавления в растянутой зоне (рис. 6). Под сжатым поясом ригеля бетон работает на смятие. При достижении достаточных деформаций в растянутой зоне происходит разрушение бетонного ядра за счет изгиба. На зависимости «момент – угол поворота» момент протекания данного явления находится за точкой с максимальной кривизной.

Усиление стойки бетоном позволяет повысить прочность примерно на 25-40% и жесткость на 40-55%.

Анализ напряженно-деформированного состояния был проведен численными методами. Для дискретизации континуальной системы узла был использован метод конечного элемента. Расчет был проведен при помощи программного комплекса «МИРАЖ» [5]. Стальная оболочка была смодели-

рована пластинами (241 элемент), бетонное ядро – объемными конечными элементами (241 элемент), граничный слой – пластинами (241 элемент), эмитирующими сцепление стальной облоймы с бетонным ядром. При построении модели была учтена физическая нелинейность материалов. Законы деформирования материала были заданы кусочно-ломанными диаграммами «напряжение – относительные деформации». Для вычисления эквивалентных напряжений при оценке напряженно-деформированного состояния материала стальной оболочки принята энергетическая теория Губера-Генки-Мизеса, для бетонного ядра – модифицированная теория Баландина-Генуева.

На рис.7 представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований Т-образных узлов с параметром  $\beta \leq 0,9$  со схожими геометрическими характеристиками. PB-5, mPB-5 – кривые «момент–поворот» построенные соответственно по экспериментальным данным и результатам расчета математической модели для узла усиленного бетоном; PB-12, mPB-12 – для полого узлового соединения. Горизонтальными линиями показаны предельные моменты, вычисленные по различным методикам: Цетлина [6], Wardeniera [7], Szlendaka [8] – для полых узлов с  $\beta \leq 0,9$  и для узлов усиленных бетонами с  $\beta \leq 0,9$  – горизонтальной линией UB (при выведении зависимости по схеме «трехшарнирной линии текучести» использован метод предельного равновесия в кинематической постановке [4]). На рис.8 представлены результаты исследования узлов с параметром  $\beta \approx 1$ . Где PB-16, PB-17 – экспериментальные зависимости момент «угол поворота» соответственно для узлов: полого и со стойкой усиленной бетоном на напрягающем цементе; mPB-16, mPB-17 – зависимости момент «угол поворота» полученные при расчете моделей узлов соответственно PB-16, PB-17. Горизонтальная линия – предельный момент, вычисленный по методике предложенной Wardenier для полых узлов с  $0,9 < \beta \leq 1$  [7].

Оценку сходимости результатов расчета полученных на модели с экспериментом принимаем исходя из совпадения кривых «момент-угол поворота» и соотношения пластических моментов, экспериментального и теоретического. Отличие теоретического пластического момента от экспериментального для полых узлов с параметром  $\beta \leq 0,9$  и  $\beta \approx 1$  (PB-12,

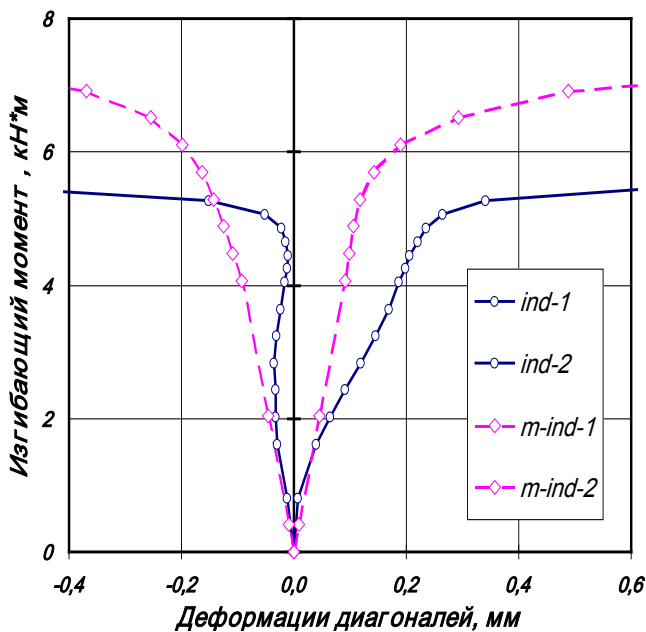


Рисунок 3.15 Зависимость «Момент – деформация диагоналей» для узла PB-16

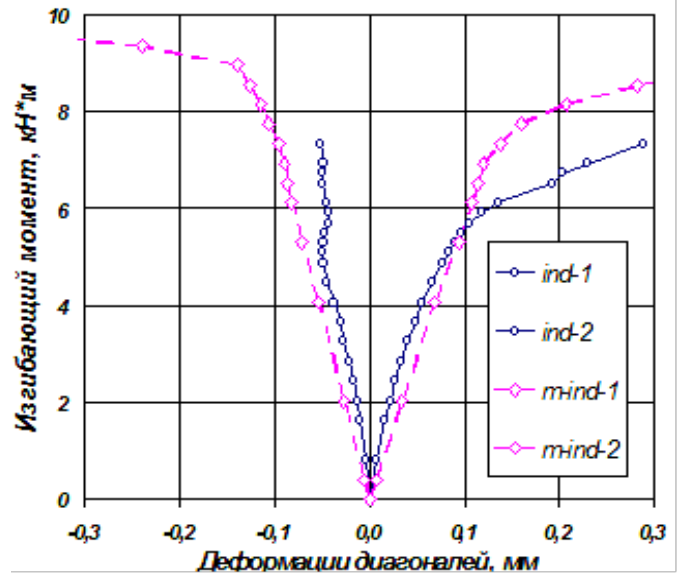


Рисунок 3.15 Зависимость «Момент – деформация диагоналей» для узла PB-17

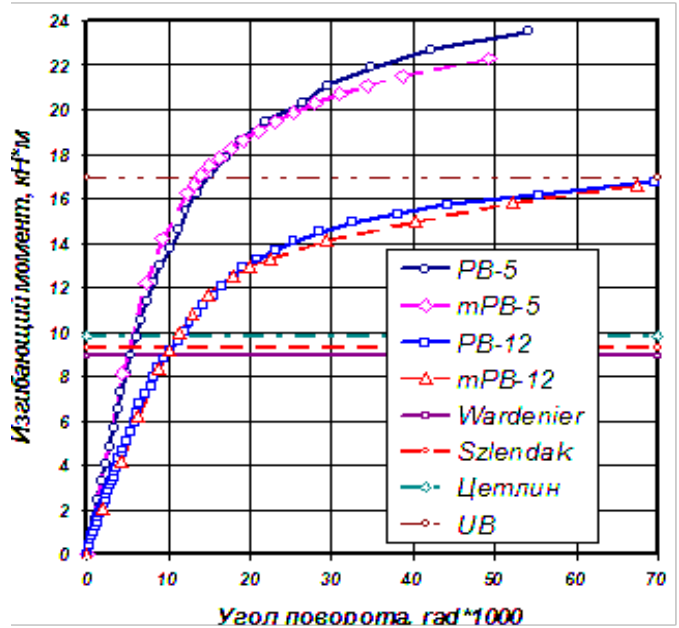


Рисунок 7 Анализ сходимости экспериментальным данным с

PB-16) составляет порядка 3-7%. Для узлов со стойкой усиленной бетоном теоретический пластический момент отличается от экспериментального момента до 9% для узлов с параметром  $\beta \leq 0,9$  и 13% - для узлов с  $\beta \approx 1$ , при разбросе экспериментальных данных порядка 9-12%. Для узлов, полого и усиленного бетоном с параметром  $\beta \approx 1$ , дополнительно построены теоретические зависимости деформации диагоналей в узлах от величины действующего в ригеле изгибающего момента и сравнены с экспериментальными данными.

Следует отметить что, расчет моделей дает приемлемый результат. Это позволяет в дальнейшем вести анализ напряженно-деформированного состояния подобных узлов с привлечением возможностей метода конечных элементов.

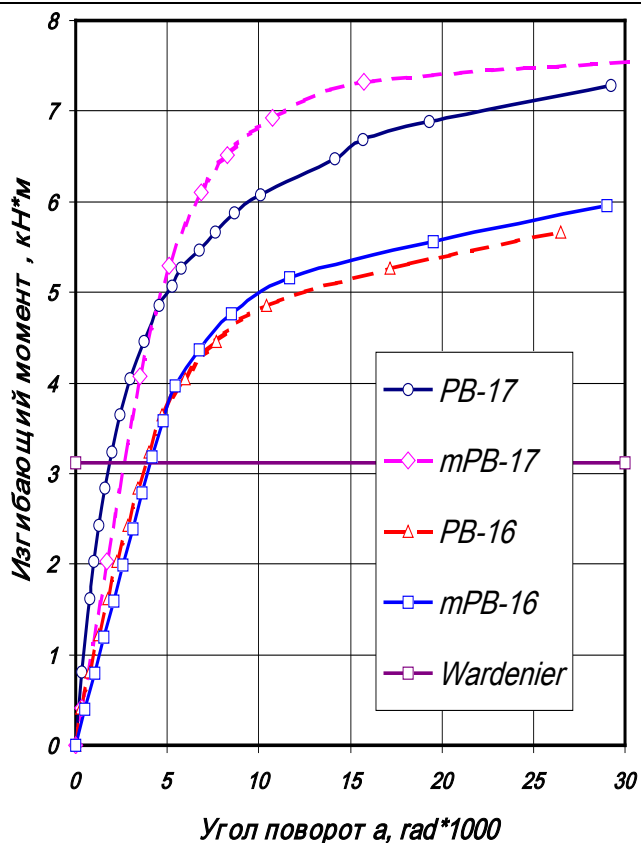


Рисунок 8. Анализ сходимости экспериментальных данных с результатами расчета математических моделей ( $0,9 < \beta \leq 1$ )

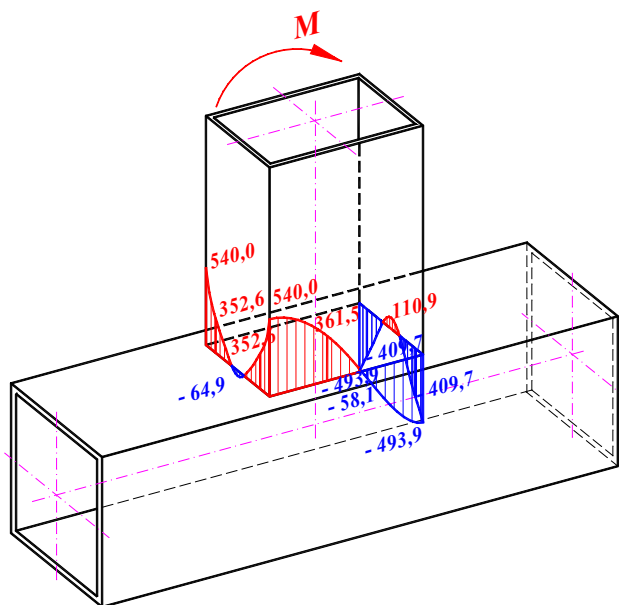


Рисунок 9. Распределения напряжений в ригеле по контуру стыка со стойкой в узле PB-12 (полый,  $\beta \leq 0,9$ )

При определении экспериментального угла поворота была отмечена необходимость в анализе напряженно-деформированного состояния ригеля. Целесообразность проведения данного анализа обусловлена тем, что для исследуемых узлов следует рассматривать помимо работы стойки, работу ригеля и сварных швов. Для анализа работы полых и усиленных бетоном узлов с  $\beta \leq 0,9$  и  $\beta \approx 1$  были построены

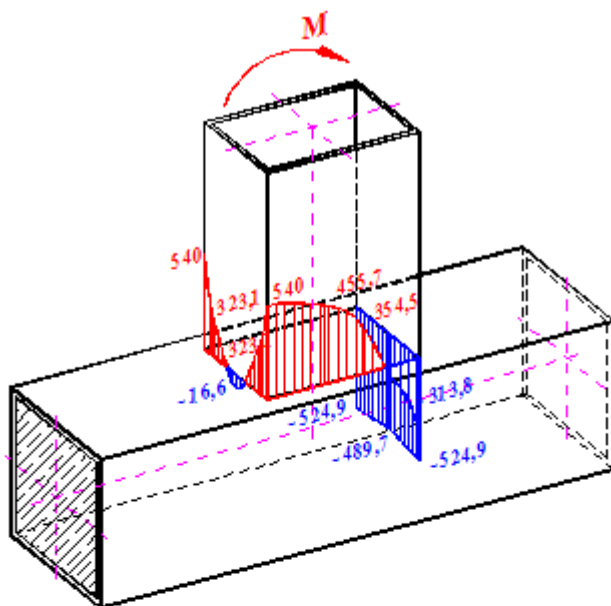


Рисунок 10. Распределения напряжений в ригеле по контуру стыка со стойкой в узле PB-5 (с бетоном,  $\beta \leq 0,9$ )

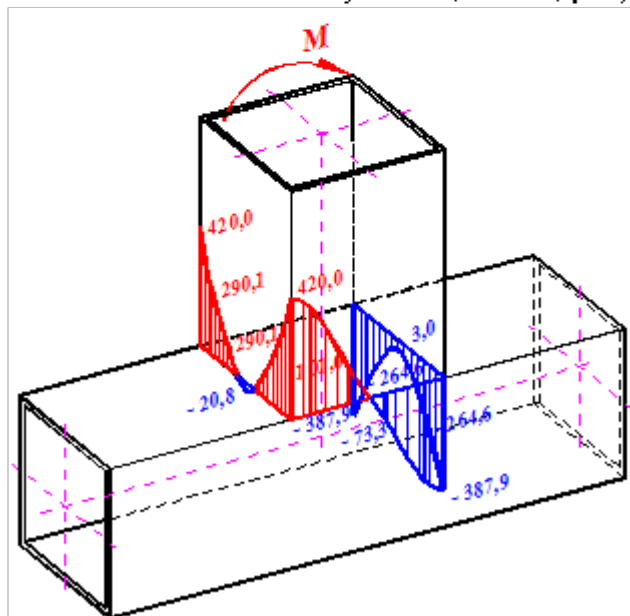


Рисунок 11. Распределения напряжений в ригеле по контуру стыка со стойкой в узле PB-16 (полый,  $\beta \approx 1$ )

эпюры напряжений в ригеле на уровне стыка со стойкой, при действии пластического момента в узле (соответствующего значению момента на кривой «момент-поворот» в точке с максимальным радиусом кривизны).

Для полого узла с параметром  $\beta \leq 0,9$  (рис.9) уровень напряжений в сжатой и растянутой полках, примерно одинаковы. В центре полок эпюра напряжения меняет знак, что говорит о недостаточной их нагруженности. Эпюра напряжений в стенке ригеля симметрична, в крайних точках на эпюре наблюдаются наибольшие значения. В узле, усиленном бетоном, с  $\beta \leq 0,9$  (рис.10) характерна высокая нагруженность сжатого пояса ригеля (в отличие от полого узла), причем напряжения в сжатой полке более равномерны по ширине стыка ригеля со стойкой. Уровень напряжений в сжатой зоне примерно на 40% выше, чем в растянутой (в полом – на 13%). В растянутом поясе эпюра напряжений меняет знак в цен-

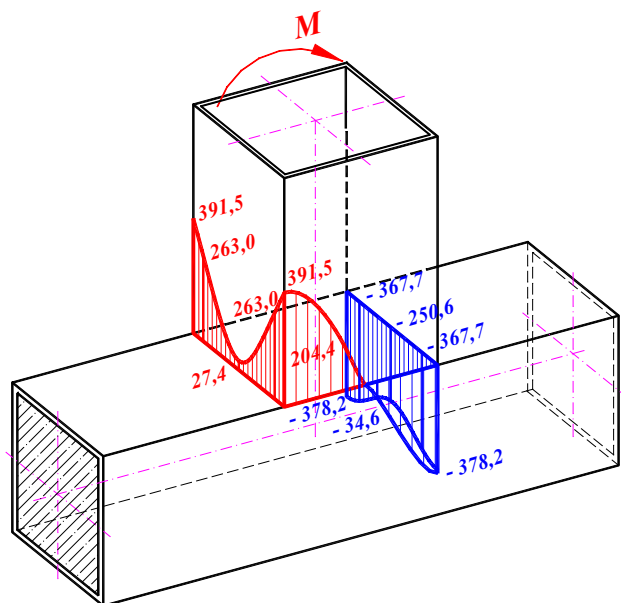


Рисунок 12. Распределения напряжений в ригеле по контуру стыка со стойкой в узле РВ-17 (с бетоном,  $\beta \approx 1$ )

тральной части, перепад напряжений менее чем в полум. В растянутой зоне стенки ригеля на уровне стыка со стойкой напряжения достигают своей наибольшей величины и более чем на 40% превышают напряжения сжатой зоны (в полум узле отличие – менее 10%). Эпюра напряжений меняет знак на расстоянии 0,21 высоты ригеля относительно сжатой полки, тогда как в полум – на 0,43.

В полум узлах с  $\beta \approx 1$  (рис.11) характерна активная работа стенок ригеля. Введение бетона в стойку (рис.12) позволяет несколько разгрузить стенку ригеля и более активно включиться в работу полкам ригеля (особенно сжатой). Уровень напряжений в полум узле сжатой и растянутой полкам примерно одинаков. Отличие максимальных значений на 10%, напряжения в сжатой полке распределены более равномерно, чем в растянутой. В центре растянутой полки эпюра напряжений меняет свой знак, перепад незначительный около 7%. В узле с усиленной бетоном стойкой характерна загруженность сжатой полки ригеля и более равномерное распределение напряжений по ширине пояса. В растянутой полке напряжения одного знака, в центральной части уровень напряжений существенно снижается.

Таким образом, усиление стойки бетоном позволяет активно задействовать в работе весь сжатый пояс ригеля. Возникает целесообразность в усилении полого ригеля бетоном в области самого узла. Более активно начинает работать и растянутый пояс. Стенка ригеля за счет этого разгружается.

### ВЫВОДЫ

1. Применение для заполнения полостей труб бетонов на напрягающих цементах позволяет достигнуть надежного

сцепления бетонного ядра со стальной оболочкой, обеспечивая их совместность работы.

2. Заполнение стоек из прямоугольных труб бетоном позволяет снизить деформативность и повысить прочность самого узла.
3. В узлах с параметром  $\beta \leq 0,9$ , полум и усиленных бетоном, в работе активно участвует полка стойки, для узлов с  $\beta \approx 1$  характерно активное включение в работу стенок стойки. Введение бетона в стойку позволяет в процессе работы узла несколько разгрузить стенки ригеля и активно включиться в работу его сжатой полке.
4. Прочность узла с  $\beta \approx 1$  при усилении его бетоном перестает определяться прочностью основного элемента конструкции (в данном случае – стойкой).
5. Результаты расчета математических моделей узлов с параметром  $\beta \leq 0,9$  и  $\beta \approx 1$  (полум и усиленных бетоном) имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Ввиду сложности процесса создания модели возникает необходимость в упрощенных инженерных зависимостях в определении прочности и учета деформативности узлов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мухин А.В., Зинкевич И.В., Головки Л.Г., Лебедь В.А. Податливость узловых соединений рамных конструкций из прямоугольных труб. – Брест: Брестский политехнический институт. Труды XXV научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов. «Проблемы и перспективы современных строительных конструкций и технологий». – 1998. – С. 3-7.
2. Лукша Л.К. Прочность трубобетона. — Мн.: «Вышэйшая школа», 1977.-95с.
3. Мухин А.В., Зинкевич И.И. Усиление бетонами на напрягающих цементах конструкций из прямоугольных стальных труб. – Теория и практика металлических конструкций: Международная конференция. Сборник трудов, т2, Донецк — Макеевка — 1997. - 178с.
4. Зинкевич И.В., Лебедь В.А., Мухин А.В. К усилению Т-образных узлов из прямоугольных труб бетонами на напрягающих цементах. – Кишинёв: «Технологии современных конструкций». Молдавский технический университет. – 2000. – С. 237-240.
5. Городетский А.С., Евзеров И.Д. и др. Руководство пользователя. Программный комплекс «Мираж» расчет конструкций на прочность. Киев 1994. НИИАСС Научно-исследовательский институт автоматизированных систем в строительстве Госкомградостроительства Украины.
6. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81<sup>\*</sup>). – Москва, 1989.-149с.
7. Wardenier J. Hollow section joints. Delft, 1982. – 487p.
8. Szlendak J. Beam-Column Welded RHS Connections. – Thin-Walled Structures. - 1991, N12, p. 63-80.