

## Результаты испытания на сдвиг контактной зоны с использованием разрывной нагрузки

*В.В. Кузнецов, П.В. Сапожников, В.В. Кочерженко,*

*А.В. Марченко, А.Н. Зиятдинова*

*Белгородский Государственный Технологический Университет им. В.Г. Шухова*

**Аннотация:** В статье рассматриваются особенности результатов испытаний, проведенных для определения характеристик контактной зоны, организованной выштамповкой на стальном листе. В процессе испытания образец находился в стальной форме, в которой он изготавливался. Стальная форма применялась для запрета горизонтального перемещения стальных тонких листов и минимизировала эффект неравномерного выскользывания стальной выштамповки в направлении, перпендикулярном действию сдвигающей силы. Рассмотренные испытания проводились по специально разработанной методике, которая учитывала специфику работы контактной зоны на сдвиг, применяемой оснастки и учитывала поставленные цели исследования.

**Ключевые слова:** контактная зона, характеристики контакта, методика испытания, испытания на сдвиг, выштамповка, составная конструкция.

### Введение

Композитные конструкции нашли широкое применение в практике строительства. Отдельное место занимают многослойные составные конструкции, имеющие ряд особенностей, которые должны быть учтены в методике расчета. Существуют различные расчетные методики составных конструкций, которые применяются в инженерной практике. Особое место среди них занимает теория составных стержней и пластин А.Р. Ржаницына [1]. В контексте этой теории слои, составляющие поперечное сечение конструкции, объединяются в пакет, посредством абсолютно жестких поперечных и упруго податливых продольных связей. Способность продольных связей, заполняющих шов между слоями, сопротивляться взаимному сдвигу слоев, определяется коэффициентом жесткости шва на сдвиг.

Из отечественной практики можно назвать примеры применения составных сталежелезобетонных конструкций для изготовления плит перекрытий с внешним армированием профилированным настилом при

---

строительстве Лахта-центра в г. Санкт-Петербурге и реконструкции исторических зданий в г. Новосибирске [2]. Рассмотрением актуальных тенденций современных научных исследований составных железобетонных стержней занимался коллектив авторов под руководством Колчунова В.И [3]. Работа посвящена изучению вопросов жесткости составных конструкций при особых воздействиях. Другим примером научных исследований может являться работа Фардиева Р.Ф. [4], посвященная направлению изучению возникающих напряжений в поперечных сечениях составных усиленных стержней. В статье [5] освещаются основные проблемы, которые возникают на начальном этапе расчета составных балок, с внешним армированием, профилированным настилом и сплошной (или дискретной) затяжкой, расположенной поперек гофры. Отмечено отсутствие четких нормированных физико-механических характеристик контактной зоны «бетон - стальная пластина с выштамповкой» с учетом расположения гофр профилированного настила поперек пролета из-за чего не ясны предпосылки расчета. При этом, в СП 266.1325800.2016. «Конструкции сталежелезобетонные» есть информация о соединении стального профилированного настила и бетона, выполненного выштамповкой на внутренней стороне гофра и стат-болтами в опорных зонах. Такое соединение обладает расчетным линейным характером работы и может иметь максимальное расчетное смещение бетона и стали до 0,3 мм.

Возникает потребность в экспериментальном исследовании характеристик контактной зоны стальной пластины и бетона, организованной выштамповкой на стальном листе.

Одним из вопросов, требующих рассмотрения в контексте исследования характеристик контактной зоны «бетон - стальная пластина с выштамповкой», является определение состава бетонной смеси для

---

получения необходимого класса бетона. Проведено определение возможных соотношений крупного, мелкого заполнителя и вяжущего.

Подбор состава бетонной смеси осуществлялся по ГОСТ 27006-2019 «Бетоны. Правила подбора состава». Характеристики бетонной смеси приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики бетонной смеси

Марка бетона	Ц/В	Марка цемента	Фракция крупного заполнителя (щебень), мм	Модуль крупности мелкого заполнителя (песок)	Подвижность бетона
B30	2.14	42.5Н	5-20	2-2,5	П4
B25	2.11	32.5Н			
B12.5	1.52	22.5Н			

Промежуточные результаты:

- определены возможные составы бетонных смесей для получения классов бетона на сжатие B12,5, B25 и B30.

С использованием методики экспериментального исследования характеристик контактной зоны [5] были изготовлены две серии из бетонов класса B12,5 и B25 специальных образцов [5, 6] для определения характеристик контактной зоны «бетон - стальная пластина с выштамповкой» и три серии образцов из бетонов класса B12,5, B25 и B30 для определения применяемого состава бетонной смеси, которые могут быть использованы в дальнейших исследованиях. Из серий образцов для определения прочности бетона на сжатие А1, Б1 и В1, для изготовления которых применялся бетон класса B12,5, B25 и B30, соответственно, были отобраны для анализа по 4 образца.

Из серий А и Б специальных образцов [5, 6], для изготовления которой применялся бетон класса B12,5 и B25, соответственно, были отобраны для

анализа по 4 образца. Из серий А1, Б1 и В1 образцов для определения прочности бетона на сжатие, для изготовления которой применялся бетон класса В12,5, В25 и В30, соответственно, были отобраны для анализа по 4 образца.

При испытании образцов учитывался существующий методический опыт испытаний образцов на сдвиг и срез, описанный в ГОСТ 10922-2012 «Арматурные и закладные изделия». Задействованные при испытаниях зон контакта изготовленные образцы относятся к двусрезным образцам, для которых не требуется применение дополнительной оснастки, для исключения поворотов образца вокруг своей оси. В процессе испытания учитывался широкий опыт испытаний, описанный в зарубежных нормативных документах таких как RILEM/CEB/FIB. «Recommendation on reinforcement steel for reinforced concrete», RILEM/CEB/FIP «Bond test for reinforcing steel», научной литературе [7, 8]. Применялись рекомендации, из отечественных государственных стандартов и сводов правил, при этом учитывались существующая патентная [9] и экспериментальная базы [10], а также особенности и цели исследований.

Схема испытания и расчетная для выдергивания стального листа с использованием стальной обоймы показана на рис. 1.

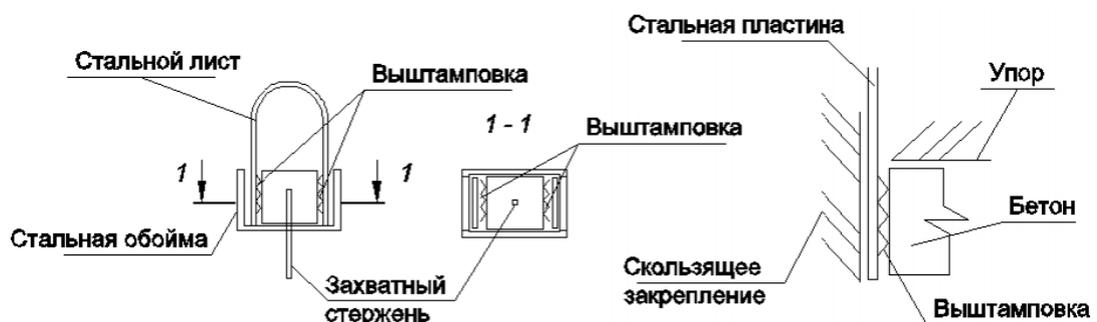


Рис. 1. – Схема испытания и расчетная для выдергивания стального листа с использованием стальной обоймы

В контексте данной статьи будут рассмотрены:

- результаты предварительного экспериментального исследования по определению характеристик материалов, участвующих в дальнейших исследованиях;

- результаты экспериментального исследования характеристик контактной зоны «бетон - стальная пластина с выштамповкой».

## 1. Результаты предварительных исследований основных механических свойств используемых материалов (стального настила и применяемых бетонов)

При испытаниях были получены характерные диаграммы деформирования стального профилированного настила и бетонов. Средненные расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования стального настила и бетонов показаны на рис. 2.

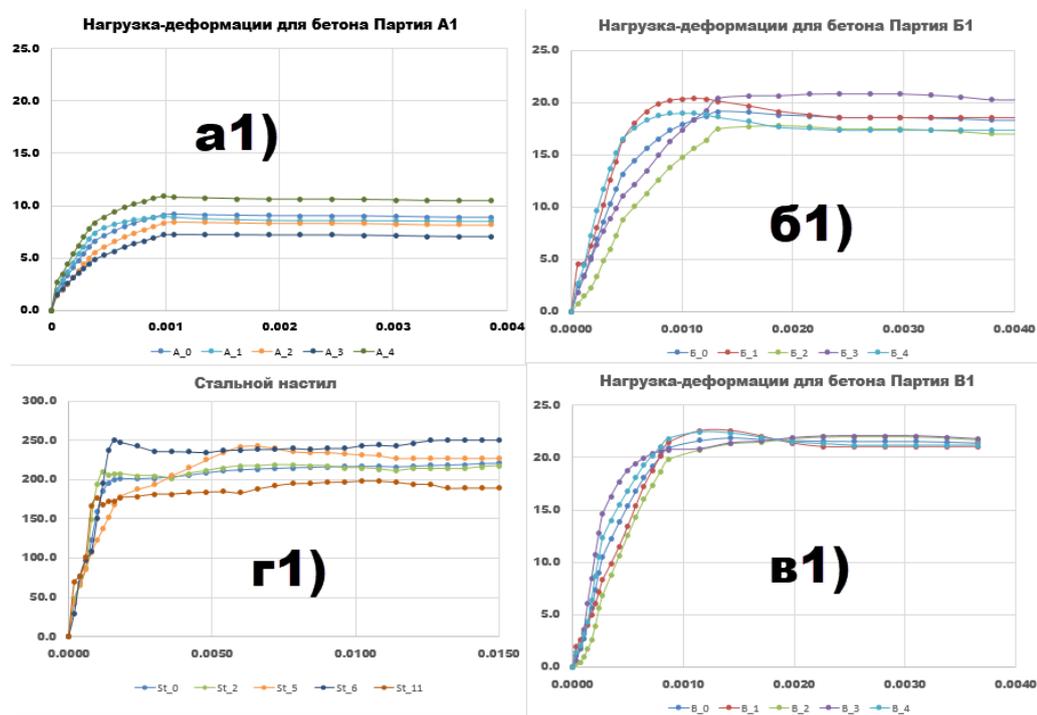


Рис. 2. – Средненные диаграммы деформирования бетонов класса (а1) В12,5, (б1) В25, (в1) В30 и (г1) стального настила

На диаграммах рис. 2 горизонтальная ось не имеет размерности (относительное удлинение - сжатие), вертикальная ось имеет размерность МПа.

При испытаниях были определены средние значения начального модуля упругости бетона и значения призмочной прочности бетона на сжатие  $E_{b0\_B12.5}=26059$  МПа,  $R_{bn\_B12.5}= 9.28$  МПа  $E_{b0\_B25}=17881$  МПа,  $R_{bn\_B25}= 18.33$  МПа,  $E_{b0\_B30}=34904$  МПа,  $R_{bn\_B30}= 22.08$  МПа.

Аналогичным образом, были определены средние значения модуля упругости стального настила и прочность при растяжении  $E_s = 150736$  МПа,  $R_s = 225.56$  МПа.

## **2. Уточнение методики испытаний для определения характеристик контактной зоны**

При испытаниях были уточнены цели и методика исследования контактной зоны «бетон - стальная пластина с выштамповкой»:

- не применялись тензодатчики, расположение которых методически может применяться для определения выравненных напряжений в стальной пластине. При расположении датчиков на расстоянии 3 см от грани бетонного кубика (8-9 см от центра зоны контакта), напряжения обладали ярко выраженной линейной зависимостью относительно действующей нагрузки, существенные отклонения от линейной зависимости не обнаружены, удалось подтвердить отсутствие неупругих деформаций в стальной пластине, на каждом этапе нагружения;

- сдвигающая сила при перемещениях стальной и бетонной частей образца 0,3мм определялась линейной интерполяцией по агрегированным данным. При испытаниях образцов малого размера с разрушающей нагрузкой, не превышающей 1,5 тс, перемещения имели значения 4-8 мм, в подобной ситуации ступень, соответствующая сдвигу 0,3 мм, имела большую

погрешность при прямом измерении. При использовании агрегированных данных погрешность минимизировалась;

- отмечена возможная потребность в применении к результатам испытаний специальных образцов, выполненных по разработанной методике [5, 6] дополнительного масштабного коэффициента, который будет учитывать неравномерность включения выштамповки в работу при длинной зоне контакта.

При испытаниях были проведены все этапы контроля качества изготовления образцов. В ходе визуальной оценки и нумерации образцов не было обнаружено нежелательных зазоров и использование в процессе испытаний дополнительных прокладок не потребовалось. Величина зазора либо была менее 0,1 мм, либо отсутствовала.

При оценке параметров, вовлекаемых при применении предлагаемой методики испытаний для определения характеристик контактной зоны стальной пластины и бетона, существенных «шумовых эффектов» выявлено не было. По оценке, проведенной в процессе проведения испытаний, наибольшее влияние на смещения стальной пластины относительно бетонной части образца имело механическое сцепление, возникающее при сопротивлении бетона усилиям смятия и среза, обусловленным наличием выштамповки на стальной пластине.

Как отмечалось ранее, для определения характеристик контактной зоны «бетон - стальная пластина с выштамповкой» были изготовлены две серии из бетонов класса В12,5 и В25 специальных образцов [5, 6].

### **3. Результаты определения характеристик контактной зоны стальной пластины и бетона, организованной выштамповкой на стальном листе**

По проведенным испытаниям была выполнена оценка характера разрушения бетонной части образцов. Обнаружены два характерных способа разрушения бетонной части образцов. В ряде случаев происходило

выкалывание верхней торцевой части образца, разрушение имело характерное полное выскальзывание стального листа из формы. В других случаях можно было наблюдать горизонтальный раскол образца, такой тип разрушения мог не сопровождаться полным выскальзыванием стального листа и часто приводил к произвольному смещению и повороту отделившейся части образца в стальной форме, которое можно было заметить визуально. Схема разрушения образцов с выкалыванием верхней части (слева) и раскалыванием образца горизонтально (справа) показана на рис. 3.



Рис. 3. – Схема разрушения образцов с выкалыванием верхней части (слева) и раскалыванием образца горизонтально (справа)

Оба вида разрушения служили сигналом окончания испытания, отслеживалось отсутствие специфических нерасчетных случаев работы образцов при испытаниях, что позволяло получить достоверную картину характера работы контактной зоны «бетон - стальная пластина с выштамповкой» под сдвигающей нагрузкой.

По проведенным испытаниям были получены зависимости «выдергивающая нагрузка-смещение».

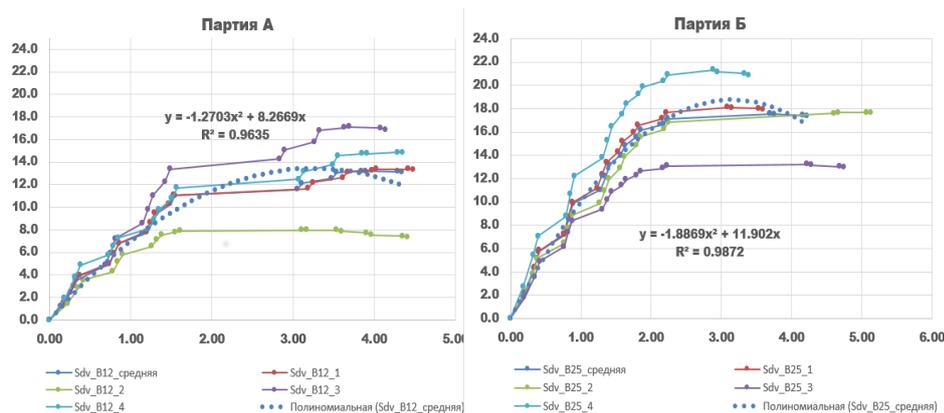


Рис. 4. – Зависимости «выдергивающая нагрузка-смещение» для партии А (слева) и Б (справа)

При аппроксимации осредненных характеристик были определены функциональные зависимости, которые можно использовать для дальнейших расчетов. Зависимости «выдергивающая нагрузка-смещение» для партии А (слева) и Б (справа) показана на рис. 4. На диаграммах рис. 4 горизонтальная ось имеет размерность мм, вертикальная ось имеет размерность Кн.

### Заключение

При испытаниях были достигнуты следующие цели:

- 1) Определены возможные составы бетонных смесей для получения классов бетона на сжатие В12,5, В25 и В30;
- 2) Определена сила сцепления между бетоном и стальной пластиной, при организации контакта выштамповкой, расположенной перпендикулярно направлению действия разрывной нагрузки;
- 3) Зафиксированы на каждом этапе передачи разрывной нагрузки величины смещения стальной пластины относительно бетона, вследствие упругих и пластических деформаций, происходящих в контактной зоне «бетон - стальная пластина с выштамповкой»;
- 4) Подтверждено предположение о равномерности и симметричности величин смещения стальной пластины относительно бетона,

возникающих в процессе ступенчатого нагружения при использовании различных классов бетона;

5) Определен хрупкий без четко выраженных пластических деформаций, характер разрушения контактной зоны бетона и стальной пластины, имеющей выштамповку;

6) Определен расчетный нелинейный характер и найдены аппроксимирующие зависимости «выдергивающая нагрузка-смещение» стальной пластины относительно бетона.

7) При дальнейших исследованиях обоснованно применение балочных образцов с геометрическими размерами зоны контакта «бетон - стальная пластина с выштамповкой», равной суммарной площади зоны контакта, образовавшейся при испытаниях специальных образцов [5, 6].

8) Применение балочных образцов с внешним армированием, профилированным настилом и сплошной (или дискретной) затяжкой, расположенной поперек гофры шириной 200 мм позволит не применять дополнительные масштабные коэффициенты к экспериментальным зависимостям «выдергивающая нагрузка-смещение» которые приведены в данной статье.

### Литература

1. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. М., Стройиздат, 1986г. -316с.

2. Шафрай С.Д. Архитектурно-конструктивные приемы в реконструкции старых зданий г. Новосибирска // Вестник ТГАСУ. 2015. №2 С. 49-53.

3. Колчунов В.И., Марьенков Н.Г., Омельченко Е.В., Тугай Т.В., Бухтиярова А.С. Методика определения жесткости плосконапряженных и стержневых железобетонных составных конструкций при сейсмических воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 2. С. 12–15.

4. Фардиев Р.Ф., Ашрапов А.Х. Применение теории составных стержней к определению характера распределения напряжений в поперечном сечении усиленного внецентренно сжатого элемента // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4 (34). С. 363–369.

5. Кочерженко В.В., Сапожников П.В., Кузнецов В.В. Планирование эксперимента испытания выштамповки на сдвиг в перпендикулярном направлении // Инженерный вестник Дона, 2023, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8796.

6. Кочерженко В.В. Сапожников П.В. Кузнецов В.В. Никулин В.С. Богачев Д.А. Методика испытания на сдвиг контактной зоны с использованием разрывной и сжимающей нагрузки // Инженерный вестник Дона, 2024, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9108.

7. Hafezolghorani Milad, Hejazi Farzad, Vaghei Ramin, Bin Jaafar Mohd Saleh Karimzade Keyhan Simplified Damage Plasticity Model for Concrete, Structural Engineering International Nr. 1/2017, pp. 68-78.

8. Issa M.S., Elzeiny S.M., Aly E.H., Metwally I.M. Investigation of reinforced concrete columns strengthened externally with steel jacket and fiber composite, Civ. Eng. Res. Mag. 30 (3) (2008). pp. 831–848.

9. Анпилов С.М., Гейдт И.Р., Сахаров Г.С., Римшин В.И., Сорочайкин А.Н. Атомная электрическая станция. Патент № 2767308. Бюл. 2022 г. № 8 URL: patents.s3.yandex.net/RU2767308C1\_20220317.pdf

10. Румянцева И. А. Работы разных видов выштамповок на сдвиг // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. №5. С. 74-79.

### References

1. Rzhanicyn A.R. Sostavnye sterzhni i plastinki [Composite rods and plates]. М., Strojizdat, 1986. 316 p.



2. SHafraj S.D. Vestnik TGASU. 2015. №2. pp. 49-53.
3. Kolchunov V.I., Marienkov N.G., Omelchenko E.V., Tugai T.V., Bukhtiyarova A.S. Industrial and Civil Engineering. 2014. № 2. pp. 12-15.
4. Fardiev R.F., Ashrapov A.H. Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2015. № 4. pp. 363-369.
5. Kocherzhenko V.V., Sapozhnikov P.V., Kuznetsov V.V IVD. 2023, №11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8796](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8796).
6. Kocherzhenko V.V., Sapozhnikov P.V., Kuznetsov V.V IVD. 2024, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9108](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9108).
7. Hafezolghorani Milad, Hejazi Farzad, Vaghei Ramin, Bin Jaafar Mohd Saleh. Structural Engineering International Nr. 1/2017, pp. 68-78.
8. Issa M.S., Elzeiny S.M., Aly E.H., Metwally I.M. Civ. Eng. Res. Mag. 30 (3) (2008). pp. 831–848.
9. Anpilov S.M., Gejdt I.R., Saharov G.S., Rimshin V.I., Sorochajkin A.N. Atomnaya elektricheskaya stanciya [Nuclear power plant]. Patent № 2767308. Byul. 2022 g. № 8 URL: [patents.s3.yandex.net/RU2767308C1\\_20220317.pdf](http://patents.s3.yandex.net/RU2767308C1_20220317.pdf)
10. Rumyanceva I. A. Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2014. №5. pp. 74-79.

**Дата поступления: 22.04.2024**

**Дата публикации: 2.06.2024**