

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ИЗ КЕРАМЗИТОБЕТОНА С ПОПЕРЕЧНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

*А. А. Невдах<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Аспирант кафедры строительных конструкций, младший научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: alina.nevdah@mail.ru

### **Аннотация.**

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние в зоне среза железобетонных балочных элементов из керамзитобетона с поперечным армированием.

Целью работы является выполнение экспериментально-теоретических исследований механизмов разрушения балок и валидации существующих расчетных моделей на основе сформированной базы данных. Существующие нормативные подходы, использующие понижающие коэффициенты, не всегда в полной мере учитывают сложное напряженно-деформированное состояние в железобетонных балках из легкого конструкционного бетона и могут существенно занижать реальные прочностные характеристики.

Материалы и методы включают анализ механических и эмпирических моделей сопротивления срезу, а также формирование и изучение обширной базы данных. При анализе варьировались ключевые конструктивные и материальные параметры, такие как пролет среза  $a/d$ , коэффициент поперечного армирования  $\rho_{sw}$  и прочность бетона  $f_{ck}$ .

Полученные результаты подтверждают, что особенностью разрушения керамзитобетонных балок является развитие наклонных трещин, проходящих через пористый крупный заполнитель. Установлена роль поперечного армирования: его наличие значительно повышает сопротивление срезу, компенсируя склонность элементов без поперечного армирования к хрупкому разрушению по сжатой бетонной полосе.

Выводы указывают на необходимость усовершенствования расчетных методик. Предлагается детальная проработка аналитических моделей, основанная на валидации по экспериментальным данным, что позволит повысить эффективность проектирования железобетонных конструкций из керамзитобетона.

### **Введение**

В современных условиях строительства, как в мировой практике, так и в Республике Беларусь, приоритетным является направление, связанное со снижением материалоемкости и уменьшением собственного веса конструкций без утраты их несущей способности. В этом контексте керамзитобетон выступает как высокоперспективный строительный материал, сочетающий невысокую плотность, высокую призмную прочность на сжатие, а также улучшенные тепло- и звукоизоляционные характеристики. Применение конструкционного керамзитобетона позволяет создавать долговечные и эффективные строительные конструкции.

Однако внедрение железобетонных балочных элементов из керамзитобетона требует глубокого анализа их сопротивления срезу, особенно в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Ранние экспериментальные исследования демонстрируют, что сопротивление срезу конструкций из легкого конструкционного бетона, как правило, ниже, чем у аналогичных конструкций из бетонов нормального веса (тяжелых бетонов) при прочих равных условиях.

В современных отечественных и зарубежных нормативных документах эта особенность учтена преимущественно путем введения понижающих коэффициентов и существенных ограничений на прочность бетона. Подобные подходы могут существенно занижать реальные прочностные характеристики легкого бетона, что вызывает необходимость в

адаптации нормативно-технических стандартов и углубленном изучении механизмов разрушения.

### **Обзор литературы**

Сопротивление срезу в железобетонных конструкциях является сложной проблемой, которая зависит от множества конструктивных параметров и характеристик материалов. В научной практике для определения и анализа сопротивления срезу используются два ключевых подхода:

1. Механические модели, базирующиеся на аналитических зависимостях и позволяющие в полной мере учитывать механические свойства материалов.
2. Эмпирические модели, которые опираются на результаты обобщения экспериментальных данных и могут напрямую учитывать специфические эффекты, связанные с типом и свойствами заполнителей (например, керамзита).

В большинстве своем, теоретические модели сопротивления срезу учитывают как минимум четыре составляющих, работающих в наклонном сечении: усилие в сжатом бетоне, нагельный эффект продольной арматуры, силы зацепления по берегам трещины и усилие в поперечной арматуре (при ее наличии).

В современных нормативно-технических документах [1-11] учет особенностей сопротивления срезу железобетонных элементов из легких бетонов реализован посредством введения понижающих коэффициентов прочности и существенных ограничений. Большинство из этих коэффициентов напрямую связаны с уменьшения плотности легкого бетона и, в меньшей степени, с его фактическим составом.

Такой подход, основанный на упрощенных эмпирических зависимостях, не позволяет адекватно описать сложное напряженно-деформированное состояние бетона на участках между наклонными трещинами, а также истинный характер разрушения, проходящего через пористый заполнитель. Нормативные ограничения, установленные на основе характеристик бетонов ранних поколений, могут существенно занижать реальные прочностные характеристики современных высококачественных легких конструкционных бетонов.

### **Материалы и методы**

Анализ экспериментальных данных [12-15] показывает, что тип бетона оказывает критическое влияние на характер трещинообразования и разрушения. В балках из легких бетонов наблюдается тенденция развития трещин с шероховатыми краями, которые проходят через цементный камень (матрицу) и непосредственно через заполнитель. Это приводит к снижению эффективности сил зацепления по сравнению с тяжелыми бетонами.

Вследствие структурных особенностей и пониженной эффективности механизмов сцепления, балки из легких бетонов без поперечного армирования склонны к хрупкому разрушению по сжатой бетонной полосе.

Ввиду склонности к хрупкому разрушению и особенностей микроструктуры, использование поперечного армирования значительно повышает сопротивление срезу железобетонных балок из легкого конструкционного бетона. Поперечная арматура не только воспринимает часть перерезывающей силы, но и способствует обеспечению пластичности работы элемента. Однако количественное влияние этого параметра в зависимости от типа легкого бетона и конструктивных особенностей требует дополнительного детального изучения путем выполнения натурных экспериментальных исследований.

### **Результаты исследования**

Для проведения валидации существующих расчетных моделей и углубленного изучения механизмов разрушения была сформирована обширная база экспериментальных данных, включающая результаты испытаний железобетонных балок с различным видом легких крупных заполнителей, включая керамзит.

База данных охватывает образцы, в которых варьировались ключевые конструктивные и материальные параметры, влияющие на сопротивление срезу:

1. Геометрические характеристики: Эффективная (рабочая) высота сечения  $d$ .
2. Пролет среза  $a/d$  (отношение пролета среза к рабочей высоте). Варьирование этого параметра имеет принципиальное значение, поскольку позволяет оценить переход от арочного эффекта (в коротких балках) к работе по ферменной аналогии, где роль поперечной арматуры становится решающей.
3. Коэффициенты армирования: Коэффициент продольного армирования  $\rho_s$  и коэффициент поперечного армирования  $\rho_{sw}$ .
4. Прочность легкого бетона при сжатии  $f_{ck}$ .

Исследование взаимосвязи и особенностей учета этих параметров, а также изучение характера трещинообразования и разрушения экспериментальных образцов, является основой для повышения точности прогнозирования несущей способности керамзитобетонных балок с поперечным армированием.

### **Выводы**

Сопротивление срезу железобетонных балок из легких конструкционных бетонов (керамзитобетона) определяется сложным комплексом факторов, а особенность разрушения обуславливает, как правило, меньшее сопротивление срезу по сравнению с тяжелыми бетонами.

Оценка существующих моделей сопротивления срезу показывает, что используемые консервативные понижающие коэффициенты часто основаны на упрощенной привязке к плотности и не всегда адекватно описывают действительную работу элементов из современных легких конструкционных бетонов.

Дальнейшее исследование, направленное на детальную валидацию аналитических моделей на основе сформированной экспериментальной базы данных, будет способствовать разработке (усовершенствованию) расчетных методик для конструкций из легких бетонов. Оптимизация состава бетона и внедрение новейших технологий армирования позволят повысить устойчивость к разрушению и долговечность конструкций.

### **Литература**

1. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 20.05.2022. – Минск : Научно-проектно-производственное республиканское унитарное предприятие «Стройтехнорм» (РУП «Стройтехнорм»), 2022. – 244 с.
2. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 01.09.2019. – Минск : Научно-проектно-производственное республиканское унитарное предприятие «Стройтехнорм» (РУП «Стройтехнорм»), 2021. – 310 с.
3. Бетонные и железобетонные конструкции : СНиП 2.03.01-84. – Введ. 01.01.1986 (с отменой на территории РБ). – Москва : НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – 82 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 63.13330.2018. – Введ. 20.06.2019. – Москва : АО «НИЦ «Строительство», 2019. – 124 с.
5. Model Code 2010. First complete draft. Volume 2. fib Bulletin No. 56, Lausanne, 2010. – 293 p.
6. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19), Michigan, 2019. – 628 p.
7. Structural use of Concrete – Part 1: Code of practice for design and construction. BS 8110-1:1997, London, 1997. – 160 p.
8. Design of concrete structures. CSA A23.3-04, Canada, 2004. – 232 p.
9. Standard specifications for concrete structures – 2007. “Design”. JSCE Guidelines for concrete No. 15, Japan, 2007. – 502 p.
10. Concrete structures standard – The design of concrete structures. NZC 3101-1, Wellington, 2006. – 309 p.

11. Shear Strength Model of Concrete Beams Based on Compression Zone Failure Mechanism / K.-K. Choi, J.-C. Kim, H.-G. Park. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2016. – P. 1095-1119.
12. Аль-Хужейри, Х. М. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений керамзитовофиброжелезобетонных балок и их прогибы с учетом сдвиговых деформаций : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Х. М. Аль-Хужейри ; Ростовский гос. строит. ун-т. – Воронеж, 1997. – 27 с.
13. Effect of steel fiber content on shear behavior of reinforced expanded-shale lightweight concrete beams with stirrups / Changyong Li [et al.]. – Basel : MDPI, February 26, 2021. – P. 13.
14. Laboratory investigation of shear repair of reinforced lightweight aggregate concrete beams with stirrups / Kadhim Mu'taz, Mutaz Medhlom. – Baghdad : Journal of Engineering and Sustainable Development, October, 2021. – P. 20.
15. Effect of aggregate type on the shear behavior of reinforced lightweight concrete beams / Sanghwan Cho, Min Ook Kim. - Basel : MDPI, July 9, 2024. – P. 17.