

А.Н. МАМИН^{1,2,✉}, К.В. АВДЕЕВ¹, С.А. ЗЕНИН³, А.А. БАММАТОВ⁴

¹ АО «ЦНИИПромзданий», Дмитровское шоссе, д. 46, к. 2, г. Москва, 127238, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

³ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

⁴ АО «Северсталь менеджмент», ул. Клары Цеткин, д. 2, г. Москва, 127299, Российская Федерация

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ПЕТЛЕВЫХ СТЫКОВ АРМАТУРЫ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация

Введение. В статье рассматриваются аналитические методы расчета петлевых стыков арматуры в монолитных железобетонных конструкциях. Основное внимание уделено анализу механизмов разрушения, отличающихся от классического перехлеста арматуры, и определению условий прочности конструкции.

Цель. Выделить основные возможные механизмы разрушения петлевых стыков, разработать аналитическую модель их работы и предложить усовершенствованную методику расчета для обеспечения надежности соединений.

Материалы и методы. Исследование основано на анализе существующих расчетных методик, а также на результатах численных и натуральных экспериментов. Рассмотрено три основных механизма разрушения: местное повреждение бетона от смятия, разрушение бетонного ядра между петлями и потеря сцепления арматуры с бетоном. Для описания передачи усилий через бетонное ядро предложено использование каркасно-стержневой модели.

Результаты. На основании анализа данных физических и численных экспериментов, а также с учетом зарубежного опыта предложены дополнения и альтернативные решения к принятой на сегодняшний день методике.

Выводы. Сравнительный анализ результатов расчетов по различным методикам показал некоторые различия. Для дальнейшего развития и уточнения аналитических методик расчета бетонного ядра петлевых стыков рекомендовано продолжить проведение фи-

зических и численных экспериментальных исследований.

Ключевые слова: петлевой стык, арматура, железобетонные конструкции, разрушение бетона, сцепление арматуры с бетоном, каркасно-стержневая модель, радиальное давление, прочность бетона, аналитический расчет

Для цитирования: Мамин А.Н., Авдеев К.В., Зенин С.А., Бамматов А.А. Анализ возможных механизмов разрушения петлевых стыков арматуры монолитных железобетонных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2025. № 2 (627). С. 5–15. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-5-15](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-5-15). EDN: OSIWVY

Вклад авторов

Мамин А.Н. – постановка задачи, участие в разработке методики расчета, обобщение и систематизация результатов, формулирование выводов.

Авдеев К.В. – постановка задачи, анализ экспериментальных данных, участие в формулировании выводов.

Зенин С.А. – анализ экспериментальных данных, анализ результатов выполненных расчетов, участие в формулировании выводов.

Бамматов А.А. – подбор литературы, анализ экспериментальных данных, разработка методики, выполнение и анализ результатов расчетов, участие в формулировании выводов, подготовка и оформление статьи

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.03.2025

Поступила после рецензирования 04.04.2025

Принята к публикации 10.04.2025

A.N. MAMIN^{1,2, ✉}, K.V. AVDEEV¹, S.A. ZENIN³, A.A. BAMMATOV⁴

¹ JSC "TsNIIPromzdaniy", Dmitrovskoye Shosse, 46, bld. 2, Moscow, 127238, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

³ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

⁴ JSC "Severstal Management", Klara Zetkin str., 2, Moscow, 127299, Russian Federation

ANALYSIS OF POSSIBLE FAILURE MECHANISMS OF LOOP JOINTS IN REINFORCED CONCRETE MONOLITHIC STRUCTURES

Abstract

Introduction. This paper examines analytical methods for calculating of loop joints in monolithic reinforced concrete structures. The main focus is on analyzing failure mechanisms that differ from classical reinforcement overlap and determining structural strength conditions.

Aim. To identify the main possible failure mechanisms of loop joints, develop an analytical model of their behavior, and propose an improved calculation methodology to ensure the reliability of connections.

Materials and methods. The study is based on an analysis of existing calculation methods as well as the results of numerical and full-scale experiments. Three main failure mechanisms are considered: local concrete crushing, failure of the concrete core between loops, and loss of reinforcement bond with concrete. A frame-bar model is proposed to describe force transmission through the concrete core.

Results. Based on the analysis of physical and numerical experiment data, as well as international experience, additions and alternative solutions to the currently adopted methodology are proposed.

Conclusions. A comparative analysis of calculation results using different methods revealed some discrepancies. For further development and refinement of analytical calculation methods for the concrete core of loop joints, continued physical and numerical experimental studies are recommended.

Keywords: loop joint, reinforcement, reinforced concrete structures, concrete failure, reinforcement-concrete bond, frame-bar model, radial pressure, concrete strength, analytical calculation

For citation: Mamin A.N., Avdeev K.V., Zenin S.A., Bammatov A.A. Analysis of possible failure mechanisms of loop joints in reinforced concrete monolithic structures. *Beton i Zhelozobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 2 (627), pp. 5–15. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2\(627\)-5-15](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-2(627)-5-15). EDN: OSIWVY

Authors contribution statement

Mamin A.N. – problem statement, participation in the development of the calculation methodology, summarization and systematization of results, formulation of conclusions. Avdeev K.V. – problem statement, analysis of experimental data, participation in conclusion formulation.

Zenin S.A. – analysis of experimental data, evaluation of calculation results, participation in conclusion formulation.

Bammatov A.A. – literature review, analysis of experimental data, methodology development, execution and analysis of calculation results, participation in conclusion formulation, article preparation and formatting.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 24.03.2025

Revised 04.04.2025

Accepted 10.04.2025

Введение

Применение в монолитных конструкциях петлевых сопряжений рабочей арматуры без армирования бетонного ядра стыка арматуры имеет заметные технологические преимущества при возведении монолитных железобетонных зданий и сооружений [1–3], однако на сегодняшний день такие сопряжения применяются в основном на объектах атомной промышленности. Их более широкое распространение ограничено сложностью и недостаточной изученностью напряженно-деформированного состояния сопряжения, прежде всего бетонного ядра и участков передачи на него усилий от арматуры. На сегодняшний день в отечественной практике при расчете прочности для статического нагружения нормирована проверка возможных механизмов разрушения (раскалывание бетонного ядра, срез по наклонным площадкам и потеря анкерующей способности петлевых выпусков) полуэмпирическими способами, предложенными в методике НИИЭС Гидропроекта [1, 2, 4]. В статье на основании анализа дополнительных данных физических и численных экспериментов, а также с учетом зарубежного опыта предложены дополнения и альтернативные решения к методике [1, 2, 4].

Методика расчета НИИЭС Гидропроекта

Методика предполагает проверку несущей способности петлевых стыков при статических нагрузках с учетом трех возможных механизмов разрушения:

- раскалывание ядра под петлями;
- срез ядра по наклонным площадкам от вторичных поперечных сил;
- потеря анкерующей способности петлевых выпусков с образованием шарнира.

Расчет на раскалывание ядра под петлями основан на анализе локального поля напряжения при различных соотношениях шага петель к диаметру

ядра с учетом прямой вставки, общая схема показана на рис. 1.

Расчет на раскалывание бетона под петлями производится из условия:

$$N_{cl} > N_s \tag{1}$$

где N_{cl} – несущая способность ядра петлевого стыка; N_s – усилие в одном арматурном стержне.

Несущую способность ядра петлевого стыка N_{cl} при проверке бетона на раскалывание определяют по формуле:

$$N_{cl} = \left[2,3 \left(\frac{U_0}{D+c_h} \right)^2 + 1,3 \right] \times S_c l \times k_c \times R_b t. \tag{2}$$

При расчете несущей способности петлевого стыка по срезу ядра бетона по наклонным сечениям, соединяющим встречные петли, используется теория прочности Мора, составляющая основу расчетной методики [1, 4]. Общая схема показана на рис. 2.

Расчет петлевых стыков при срезе по наклонным сечениям производят из условия:

$$N_{cl} > N_s \tag{3}$$

$$N_{cl} = \gamma_l \times S_s \times k_c \times ([\tau] \times \cos \beta_s + [\sigma] \times \sin \beta_s). \tag{4}$$

Расчет несущей способности стыка по критерию потери анкеровки арматуры основывается на условии равновесия арматурного стержня, состоящего из прямолинейных и криволинейных участков.

Проверку анкеровки предлагается выполнять по условию:

$$D_k \geq D_{req?} \tag{5}$$

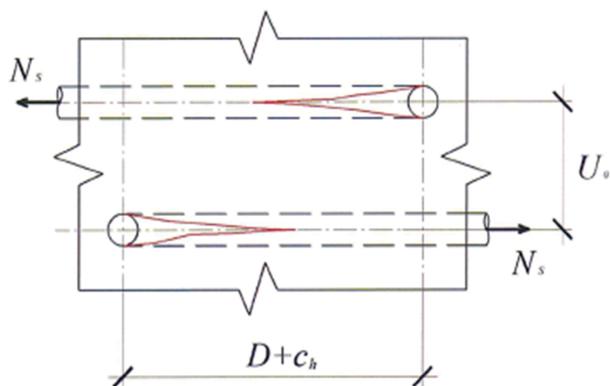


Рис. 1. Схема усилий и характер трещинообразования при раскалывании ядра

Fig. 1. The scheme of forces and the nature of cracking during core splitting

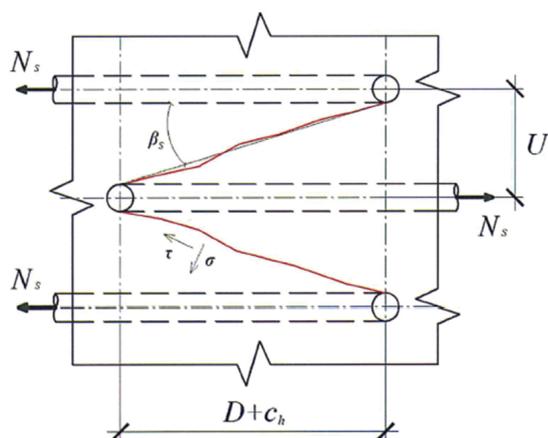


Рис. 2. Схема усилий и характер трещинообразования при срезе по наклонным сечениям

Fig. 2. The scheme of forces and the nature of cracking at shearing along inclined sections.

где D_{req} – требуемый диаметр петлевого стыка, определяемый по формуле:

$$D_{req} = \frac{0,5R_s \times d}{\pi \times R_{bond3}}, \tag{6}$$

где R_{bond3} – среднее сопротивление сцепления арматуры с бетоном по криволинейному анкеру, определяемое по формуле:

$$R_{bond3} = \eta_3 \times R_{bt}. \tag{7}$$

Предлагаемая расчетная методика

Для конструкций с петлевыми стыками предлагается выделить три возможных типа разрушения:

- местное повреждение бетона от смятия;
- разрушение бетона ядра на участке между петлями;
- нарушение сцепления арматуры с бетоном.

Рассмотрим предлагаемые аналитические зависимости для каждого механизма разрушения.

Механизм разрушения в результате местного повреждения бетона от смятия предполагает, что напряжения в арматуре изменяются от растяжения в точке В к сжатию в точке А, как показано на рис. 3а. Данная предпосылка подтверждается рядом эксперименталь-

ных исследований [2, 5–15]. Таким образом, в случае соединения, передающего в основном изгибающие моменты, радиальное давление на бетон изменяется, как показано на рис. 3б.

Для определения зависимости радиального давления на бетон от усилия в арматуре представим зону передачи давления в виде отдельных участков, настолько коротких, чтобы в их пределах усилие в арматуре F_s можно принять постоянным. Рассмотрим равновесие такого участка, ограниченного углом φ (рис. 4).

Запишем уравнение равновесия на вертикальную ось:

$$2 \times F_s \times \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) = P \int_{-\frac{\varphi}{2}}^{\frac{\varphi}{2}} \cos(\varphi) \times r \times d\varphi = 2 \times P \times \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \times r, \tag{8}$$

где $F_s = \sigma_s \times A_s$ – усилие в арматурном стержне.

Тогда для каждого стремящегося к точке отрезка петли получим:

$$P = \frac{F_s}{r}. \tag{9}$$

Согласно результатам численных и экспериментальных исследований [5, 16], максимальное ожидаемое напряжение в арматуре в точке В составляет 50 % от напряжения арматуры вне стыка в зоне чистого изгиба.

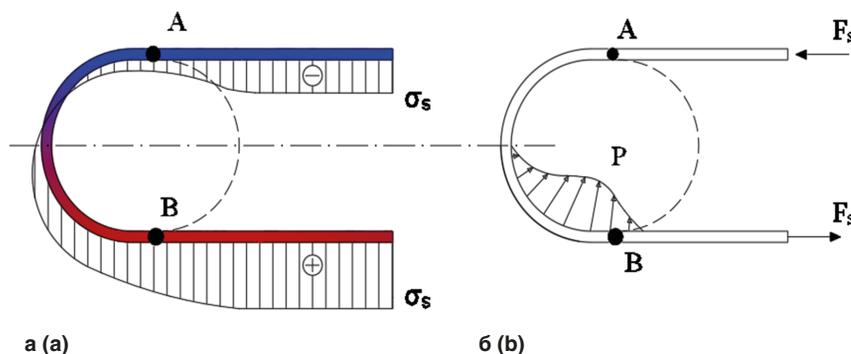
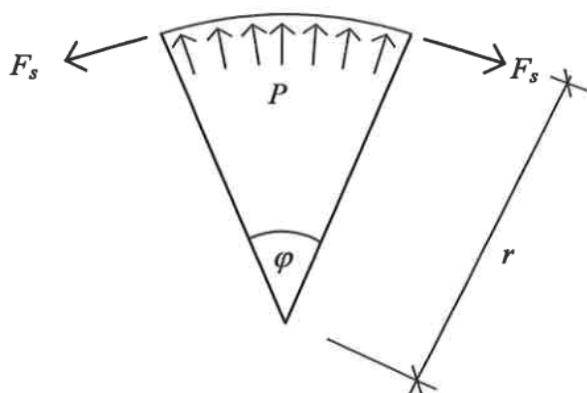


Рис. 3. Схема распределения напряжений в арматуре и давления на бетон вдоль петли
Fig. 3. Diagram of stress distribution in reinforcement and pressure on concrete along the loop



- P – давление на бетон вдоль петли
- F_s – растягивающее усилие в арматуре
- r – радиус петли стыка

Рис. 4. Статическая схема участка петлевого стыка
Fig. 4. Static diagram of the loop joint section

Таким образом, уравнение (9) для предельной стадии работы бетона на контакте с рабочей арматурой петлевого стыка будет:

$$P = 0,5 \times \frac{R_s \times A_s}{r}. \tag{10}$$

Прочность на местное смятие считается обеспеченной при условии:

$$P < \psi \times R_{b,loc}, \tag{11}$$

где $R_{b,loc}$ – расчетное сопротивление бетона сжатию при местном действии нагрузки;

ψ – коэффициент неравномерности, принимаемый для петлевого стыка 0,75.

$$R_{b,loc} = \varphi_b \times R_b, \tag{12}$$

φ_b – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\varphi_b = 0,8 \times \sqrt{\frac{A_c}{A'_c}}, \tag{13}$$

где A_c – площадь зоны передачи давления;

A'_c – расчетная площадь;

$$A_c = \frac{\pi \times D \times d_s}{2}, \tag{14}$$

$$A'_c = \frac{u \times \pi \times D}{2}, \tag{15}$$

где $D = 2r$ – диаметр петли арматуры.

Для аналитического описания механизма разрушения бетонного ядра примем за основу каркасно-стержневую модель, рекомендованную для расчетов петлевых стыков с армированием бетонного ядра в Model Code 2010 [17] и использованную в исследованиях [11, 13].

Каркасно-стержневая модель удобна для описания взаимодействия петель встречного направления, поскольку предусматривает приведение поля напряжений в бетоне ядра к усилию в дискретном стержне, которое можно описать уравнениями равновесия.

Предлагаемая модель описывает механизм передачи усилия N_s с одного арматурного стержня через бетон ядра стыка на другой стержень, как показано на рис. 5.

Растяжение в арматурном стержне приводит к образованию сжатого участка бетона, условно заменяемого наклонным стержнем, через который и передается усилие на арматурный стержень встречного направления. Как видно из рис. 5, этот участок расположен под неким углом θ , который теоретически может изменяться от близких к 0 до близких к 90 градусам значений, и любое ненулевое значение угла будет приводить к возникновению растягивающих усилий, которые стремятся к N_s при $\theta \rightarrow 90^\circ$ и к нулю при $\theta \rightarrow 0^\circ$. Таким образом, формулы определения сжимающих усилий F_c и растягивающих F_t имеют вид:

$$F_t = N_s \times \text{ctg}\theta, \tag{16}$$

$$F_c = N_s \times \cos \theta. \tag{17}$$

Данные аналитические зависимости имеют хорошую корреляцию с результатами экспериментальных исследований, в которых с увеличением расстояния между петлями несущая способность соединения уменьшалась.

Для сжатой полосы предлагается применять коэффициенты редуцирования прочности на сжатие в зависимости от напряженного состояния [18]. Таким образом, предельное сопротивление бетона стойки сжатию предлагается определять как:

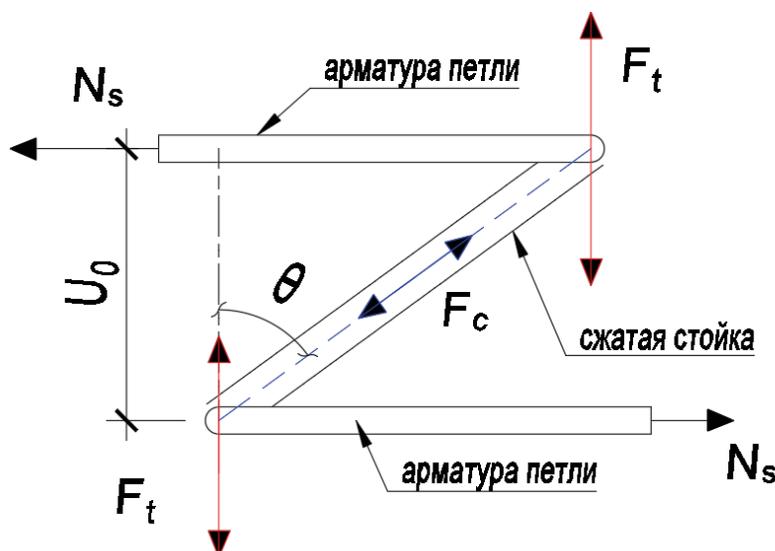


Рис. 5. Каркасно-стержневая модель петлевого стыка
Fig. 5. The frame-rod model of the loop joint

$$R_{st} = k_c \times R_{cube}, \quad (18)$$

где R_{cube} – кубиковая прочность бетона на сжатие;
 k_c – редуцирующий коэффициент, зависящий от напряженного состояния.

Для случая петлевого стыка, ввиду особенностей его напряженно-деформированного состояния и имеющихся экспериментальных данных [5], предлагается определять редуцирующий коэффициент через функцию логарифмической регрессии:

$$k_c = 0,3608 \times \ln(\theta) - 0,6168. \quad (19)$$

Следовательно, предельное усилие в наклонном стержне F_{st} :

$$F_{st} = k_c \times A_{st} \times R_{st}, \quad (20)$$

где A_{st} – площадь поперечного сечения наклонного стержня, определяемая как произведение эффективной ширины w_{st} (в плоскости чертежа на рис. 5) на эффективную высоту h_{st} (в перпендикулярной чертежу плоскости).

Для петлевого стыка предлагается упрощено принимать w_{st} равной d_s , а h_{st} – равной $S = (D+c_n) \times \cos\theta$, где c_n – длина горизонтальной прямой вставки (при наличии). Эффективная площадь поперечного сечения наклонного стержня:

$$A_{st} = k_s \times S \times d_s, \quad (21)$$

где k_s – коэффициент, учитывающий неравномерность напряжений по ядру стыка и принимаемый 0,75 при изгибе и 1,4 при растяжении.

Таким образом, предлагаемый коэффициент равнопрочности петлевого стыка определяется как:

$$k_r = \frac{F_{st}}{F_c}. \quad (22)$$

При значении k_r больше или равным единице ($k_r \geq 1$) стык считается равнопрочным рабочей арматуре, а несущую способность элемента предлагается

определять по общепринятым формулам для железобетонных элементов.

При значении k_r меньше единицы ($k_r < 1$) стык считается не равнопрочным, а несущую способность, определенную по общепринятым формулам для железобетонных элементов, следует умножать на коэффициент k_r .

Предлагаемое условие прочности можно записать в виде:

$$M_{act} < M_{ult} \times k_r, \quad (23)$$

где M_{act} – действующий на элемент изгибающий момент;

M_{ult} – предельный воспринимаемый элементом момент, определенный согласно [18] для сплошной арматуры в предположении отсутствия петлевого стыка.

Разрушение связи сцепления между арматурой и окружающим бетоном – третий рассматриваемый возможный механизм потери несущей способности петлевого стыка. Разрушение связи может произойти, если растягивающее усилие в арматуре превышает сумму максимальных напряжений сцепления вдоль предусмотренной длины петли и напряжений трения, вызванных радиальным давлением вдоль изогнутой части. Возникающие в бетоне на границе с арматурной петлей касательные напряжения показаны на рис. 6.

Напряжение сцепления возникает в результате сопротивления бетона проскальзыванию арматурного стержня. Формула сцепления для полукруглого участка петлевого стыка выводится путем рассмотрения элементарного участка длиной dx , на котором действует касательное напряжение сцепления (рис. 7). Записав уравнение равновесия для единичного элемента, получаем дифференциальное соотношение, которое затем интегрируем по всей длине изогнутой части петли.

Уравнение равновесия будет иметь вид:

$$\sigma_s \times A_s + \tau \times p_s \times dx = (\sigma_s + d\sigma_s) \times A_s, \quad (24)$$

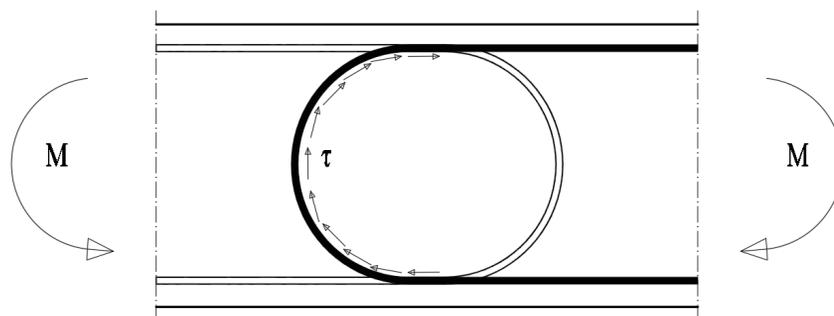


Рис. 6. Схема действия касательных напряжений по контуру ядра
 Fig. 6. The scheme of action of tangential stresses along the core contour

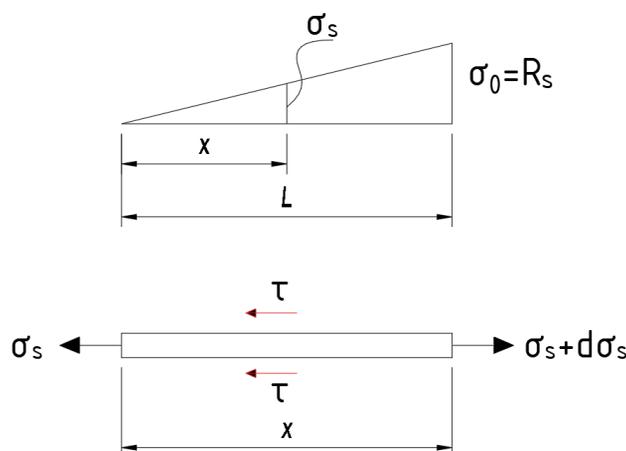


Рис. 7. Равновесие сил на единичном участке
Fig. 7. The balance of forces in a single area

где A_s – площадь поперечного сечения арматурного стержня;

p_s – периметр сечения арматурного стержня;

τ – касательные напряжения сцепления;

σ_s – напряжения в сечении арматурного стержня.

$$\frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{\tau \times p_s}{A_s} \quad (25)$$

Интегрируем по длине L :

$$\int_{\sigma_{s0}}^{\sigma_s} d\sigma_s = \int_0^L \frac{\tau \times p_s}{A_s} dx, \quad (26)$$

где σ_{s0} – это начальное напряжение в арматуре в начале рассматриваемого участка (при $x = 0$).

Определим среднее касательное напряжение на границе контакта «сталь – бетон»:

$$\tau = \frac{A_s \times (\sigma_s - \sigma_{s0})}{L \times p_s}, \quad (27)$$

где $L = 0,5\pi D + c_h$.

Как уже отмечалось, максимальное напряжение в арматуре рассматриваемой зоны составляет 50 % от расчетного сопротивления арматуры. Тем самым получаем итоговую формулу:

$$\tau = 0,5 \times \frac{A_s \times R_s}{x \times p_s} \leq \tau_{bond}, \quad (28)$$

$$\tau_{bond} = \eta_1 \times \eta_2 \times R_{bt}, \quad (29)$$

где τ_{bond} определяется аналогично R_{bond} по формуле 10.2 [18].

В случае петлевого стыка практически невозможно добиться разрушения в виде вырывания арматуры, так как длина анкеровки стержня не ограничена. Однако частичное разрушение связи может привести к повышенным деформациям.

Сравнение методик расчета

В результате всех натурных испытаний элементов с петлевыми стыками без арматуры бетонного ядра окончательное разрушение образцов происходило от текучести арматуры вне стыка. Отметим, что в ряде испытаний, особенно растянутых образцов, наблюдались косвенные признаки нарушения целостности бетона ядра. При этом нет данных замеров характеристик напряженно-деформированного состояния бетона внутри ядра.

Для сравнительного анализа результатов расчета по описанным методикам была рассчитана балка с петлевым стыком высотой 160 мм, шириной 460 мм, расстоянием между петлями 50 мм при действии центрального растяжения, в которой наиболее ярко были выражены косвенные признаки нарушения целостности ядра (образец № 11 по [5]). Призмная прочность бетона равна 36,2 МПа, прочность арматуры – 580 МПа. По результатам натурального эксперимента [5] предельная растягивающая сила для балки равна 257 кН, что составляет 94 % от расчетной силы по [18].

В сравнительной таблице приведены показатели превышения несущей способности, которые характеризуют запасы прочности бетонного ядра и равные отношению рассчитанных по рассмотренным методикам значений к значениям, полученным при расчетах по [18] несущей способности аналогичных сечений, но со сплошной арматурой.

Видно, что в рассмотренном частном случае расчетная несущая способность бетонного ядра на контакте с арматурой при разрушении от раскалывания бетона ниже, чем от его смятия.

Расчетная несущая способность бетонного ядра на участках передачи усилий между арматурными петлями по предлагаемой методике заметно ниже, чем по методике НИИЭС Гидропроекта, и для растянутых элементов ближе к экспериментально полученным значениям.

Таблица
Table

**Сравнение результатов расчетов
Comparison of calculation results**

Механизм разрушения	Методика	
	НИИЭС Гидропроекта	предлагаемая
Раскалывание бетона на контакте с арматурой	1,11	–
Смятие бетона на контакте с арматурой	–	1,15
Разрушение бетона ядра на участке между петлями	1,21	0,9
Потеря анкеровки арматуры	1,59	1,91

Рассчитанная по предлагаемой методике несущая способность стыка из условия обеспечения анкеровки арматуры выше, чем эмпирическая зависимость по [1, 19].

Выводы

1. Отличительная особенность современных петлевых сопряжений рабочей арматуры – наличие в них неармированного бетонного ядра, которое может оказаться самым уязвимым участком стыка при передаче усилий между арматурными петлями. Возможно разрушение бетона ядра как на контакте с арматурой от раскалывания или местного смятия, так и на участке между петлями, где бетон находится в сложном напряженно-деформированном состоянии.

2. Принятая сегодня при практическом проектировании и в нормативной документации методика расчетов основана на экспериментально-теоретических исследованиях НИИЭС Гидропроекта и для статических нагрузок учитывает три возможных механизма разрушения: раскалывание ядра под петлями, срез ядра по наклонным площадкам от вторичных поперечных сил и потерю анкерующей способности петлевых выпусков с образованием шарнира.

3. На основании анализа данных физических и численных экспериментов, а также с учетом зарубежного опыта предложены дополнения и альтернативные решения к методике НИИЭС Гидропроекта. Дополнительно рассмотрен механизм возможного местного повреждения бетона от смятия, анализ участка ядра между петлями выполнен с использованием каркасно-стержневой модели и на основе экспериментальных данных предложен альтернативный вариант учета разрушения анкеровки.

4. В результате всех натурных испытаний элементов с петлевыми стыками без арматуры бетонного ядра окончательное разрушение образцов происходило от текучести арматуры вне стыка. В части испытаний наблюдались косвенные признаки нарушения целостности бетона ядра. При испытаниях не замерялись харак-

теристики напряженно-деформированного состояния бетона, поэтому нет данных для прямого сравнения рассмотренных расчетных методик физическими экспериментами.

5. Проведенный сравнительный анализ результатов расчетов испытанной центрально растянутой балки показал, что:

– в рассмотренном частном случае расчетная несущая способность бетонного ядра на контакте с арматурой при разрушении от раскалывания бетона ниже, чем от его смятия. Тем не менее представляется целесообразным в практических расчетах проведение проверки и на возможное нарушение петлевого стыка от местного смятия бетона;

– расчетная несущая способность бетонного ядра на участках между арматурными петлями по предлагаемой методике заметно ниже, чем по методике НИИЭС Гидропроекта, и для растянутых элементов ближе к экспериментальным данным. До проведения новых физических и численных экспериментов в расчетах целесообразно использовать также предлагаемую методику;

– рассчитанная по предлагаемой методике несущая способность стыка из условия обеспечения анкеровки арматуры выше, чем эмпирическая зависимость по [1, 19]. Учитывая, что практически нереально разрушение петлевого стыка от вырывания отдельных стержней арматуры, но частичное нарушение анкеровки может привести к снижению жесткости и трещиностойкости сопряжения, представляется логичным отнести расчеты по потере анкеровки ко второй группе предельных состояний.

6. Для дальнейшего развития и уточнения аналитических методик расчета бетонного ядра петлевых стыков с целью повышения их надежности и экономичности следует продолжить проведение физических и численных экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Климов Е.А., Николаев В.Б. Совершенствование методики расчета промышленных бесшварных петлевых стыков арматуры железобетонных конструкций ГЭС и АЭС по предельным состояниям // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2016. № 5. С. 3–10.
2. Николаев В.Б., Горбов В.А., Белов А.А., Климов Е.А., Лисичкин С.Е. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций АЭС с модифицированными петлевыми стыками на крупномасштабных железобетонных моделях балочного типа // *Безопасность энергетических сооружений*. 2016. № 1. С. 66–81.
3. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бобров В.В., Бамматов А.А., Мартыанов К.В., Пряхин С.Н. Петлевые стыки стержневой арматуры. История развития, проблемы и актуальность // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 6 (104). С. 4–11. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-104-6-4-11>
4. Николаев В.Б., Рубин О.Д., Селезнев С.В. Расчет прочности и конструирование петлевых стыков сборных элементов // *Бетон и железобетон*. 1987. № 1. С. 38–40.
5. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бобров В.В., Бамматов А.А., Квасников А.А., Мартыанов К.В., Пугачев Б.А. Испытания элементов железобетонных конструкций с петлевыми стыками арматуры // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 6. С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.06.24-30>
6. Малахов В.В. Испытания балок с петлевыми стыками многократно повторяющимися нагрузками // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 60. С. 195–201.
7. Дорофеев В.С., Шеховцов И.В., Петраш С.В., Малахов В.В. Прочность и деформативность балок со стыком «Передерия». (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса) Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. Рівне, 2011. Вип. 22. С. 328–333.
8. Дорофеев В.С., Малахов В.В., Нестеренко С.С. Анализ работы петлевых стыков различных конфигураций // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2012. № 47. С. 96–102.
9. Дорофеев В.С., Мишутин А.В., Петраш С.В., Шеховцов И.В. К вопросу численного исследования работы петлевого стыка // *Сборник трудов 74-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу академії*. Одеса: ОДАБА, 2018. С. 252–253.
10. Дорофеев В.С., Малахов В.В. К вопросу о напряженно-деформируемом состоянии петлевых стыков изгибаемых элементов // *Вісник ОДАБА: наук.-техн. зб. – Серія: Технічні науки*. Одеса: ОДАБА, 2014. Вип. 54. С. 104–109.
11. De Lima Araújo D., Curado M.C., Rodrigues P.F. Loop connection with fibre-reinforced precast concrete components in tension. *Engineering Structures*. 2014, vol. 72, pp. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.032>
12. Dragosavié M., et al. Loop connections between precast concrete components loaded in bending. *HERON*. 1975, no. 20, pp. 3–36.
13. Ong K., C.G., Hao J.B., Paramasivam P. A strut-and-tie model for ultimate loads of precast concrete joints with loop connections in tension. *Construction and Building Materials*. 2006, vol. 20, no. 3, pp. 169–176.
14. Joergensen H.B., Hoang L.C. Tests and limit analysis of loop connections between precast concrete elements loaded in tension. *Engineering Structures*. 2013, vol. 52, pp. 558–569.
15. Sørensen J.H. et al. Tensile capacity of U-bar loop connections with precast fiber reinforced dowels. *fib Symposium 2016: Performance-based approaches for concrete structures*, pp. 102–114.
16. Мамин А.Н., Бамматов А.А., Гордеев Н.С. Численное моделирование конструкций с петлевыми стыками арматуры // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 2 (106). С. 70–79. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-70-79>
17. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin, Ernst&Sohn, 2013, 434 p.
18. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва: Минстрой России, 2019.
19. ГОСТ Р 70447-2022. Железобетонные конструкции с петлевыми стыками арматуры для объектов использования атомной энергии. Требования к конструированию и расчету. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
20. Киреева Э.И. Крупнопанельные здания с петлевыми соединениями конструкций // *Жилищное строительство*. 2013. № 9. С. 47–51.

References

1. Klimov E.A., Nikolaev V.B. Improvement of the method of calculation of industrial loop connections of fittings of reinforced concrete constructions of hydroelectric power station and the NPP at the limit state. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016, no. 5, pp. 3–10. (In Russian).
2. Nikolaev V.B., Gorbov V.A., Belov A.A., Klimov E.A., Lisichkin S.E. Experimental studies of reinforced concrete structures of nuclear power plants with modified loop joints on large-scale reinforced concrete models of beam type. *Safety of power structures*. 2016, no. 1, pp. 66–81. (In Russian).
3. Avdeev K.V., Mamin A.N., Bobrov V.V., Bammатов A.A., Martyanov K.V., Pryakhin S.N. The

- loop joints of rebars. Development history, problems and relevance. *Building and Reconstruction*. 2022, no. 6 (104), pp. 4–11. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-104-6-4-11>
4. Nikolaev V.B., Rubin O.D., Seleznev S.V. Strength calculation and construction of loop joints of prefabricated elements. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 1987, no. 1, pp. 38–40. (In Russian).
 5. Avdeev K.V., Mamin A.N., Bobrov V.V., Bammatov A.A., Kvasnikov A.A., Martyanov K.V., Pugachev B.A. Testing of elements of reinforced concrete structures with looped joints of reinforcement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2023, no. 6, pp. 24–30. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.06.24-30>
 6. Malakhov V.V. Tests of beams with loop joints with repeatedly repeated loads. *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2015, no. 60, pp. 195–201. (In Russian).
 7. Dorofeev V.S., Shekhovtsov I.V., Petrash S.V., Malakhov V.V. Prochnost' i deformativnost' balok so stykom "Perederiya". (Odesskaya gosudarstvennaya akademiya stroitel'stva i arkhitektury, g. Odessa) *Rusursoekonomni materiali, konstruksii, budivli ta sprudi: zb. nauk. prats'*. Rivne, 2011, vol. 22, pp. 328–333. (In Russian).
 8. Dorofeev V.S., Malakhov V.V., Nesterenko S.S. Analysis of the operation of loop joints of various configurations. *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2012, no. 47, pp. 96–102. (In Russian).
 9. Dorofeev V.S., Mishutin A.V., Petrash S.V., Shekhovtsov I.V. on the issue of numerous studies of the work of the loop joint. *Collection of proceedings of the 74th scientific and Technical Conference of the Academy's teaching staff*. Odessa: ODABA, 2018, pp. 252–253. (In Russian).
 10. Dorofeev V.S., Malakhov V.V. To the question of the stress-strain state of the loop joints of bent elements. *ODABA Bulletin: Scientific and Technical collection – Series: Technical sciences*. Odessa: ODABA, 2014, vol. 54, pp. 104–109. (In Russian).
 11. De Lima Araújo D., Curado M.C., Rodrigues P.F. Loop connection with fiber-reinforced precast concrete components in tension. *Engineering Structures*. 2014, vol. 72, pp. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.032>
 12. Dragosavić M., et al. Loop connections between precast concrete components loaded in bending. *HERON*. 1975, no. 20, pp. 3–36.
 13. Ong K.C.G., Hao J.B., Paramasivam P. A strut-and-tie model for ultimate loads of precast concrete joints with loop connections in tension. *Construction and Building Materials*. 2006, vol. 20, no. 3, pp. 169–176.
 14. Joergensen H.B., Hoang L.C. Tests and limit analysis of loop connections between precast concrete elements loaded in tension. *Engineering Structures*. 2013, vol. 52, pp. 558–569.
 15. Sørensen J.H. et al. Tensile capacity of U-bar loop connections with precast fiber reinforced dowels. *fib Symposium 2016: Performance-based approaches for concrete structures*, pp. 102–114.
 16. Mamin A.N., Bammatov A.A., Gordeev N.S. Numerical simulation of structures with loop joints of rebar. *Building and Reconstruction*. 2023, no. 2 (106), pp. 70–79. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-70-79>
 17. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin, Ernst&Sohn, 2013, 434 p.
 18. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. Moscow: The Ministry of Construction of Russia, 2019. (In Russian).
 19. State Standard R 70447-2022. Reinforced concrete structures with loop joints of reinforcement for nuclear power facilities. Requirements for design and calculation. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. (In Russian).
 20. Kireeva E.I. Large-panel buildings with loop joints of structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo = Housing Construction*. 2013, no. 9, pp. 47–51. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Николаевич Мамин✉, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела ОЗС № 1, АО «ЦНИИ-Промзданий»; профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции», НИУ МГСУ, Москва
e-mail: otozs@yandex.ru
тел.: +7 (903) 794-64-39

Aleksandr N. Mamin✉, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of OZS No. 1 Department, JSC "TsNIIPromzdaniy"; Professor at the Department of "Reinforced Concrete and Masonry Structures", Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: otozs@yandex.ru
tel.: +7 (903) 794-64-39

Кирилл Владимирович Авдеев, заместитель генерального директора, главный инженер, АО «ЦНИИ-Промзданий», Москва
e-mail: 6136133@mail.ru

Kirill V. Avdeev, Deputy Director General, Chief Engineer, JSC "TsNIIPromzdaniy", Moscow
e-mail: 6136133@mail.ru

Сергей Алексеевич Зенин, канд. техн. наук, заведующий лабораторией теории железобетона и конструктивных систем, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: lab01@mail.ru

Sergey A. Zenin, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of the Theory of Reinforced Concrete and

Constructive Systems, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete Structures named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: lab01@mail.ru

Арслан Асельдерович Бамматов, ведущий эксперт, АО «Северсталь менеджмент», Москва
e-mail: a.bammatof@yandex.ru

Arslan A. Bammatov, Leading Expert, JSC "Severstal Management", Moscow
e-mail: a.bammatof@yandex.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



Розенталь Н.К., Чехний Г.В.

Морозостойкость бетона. Обзор / Н.К. Розенталь, Г.В. Чехний. – М.: АО «НИЦ «Строительство», 2023. – 156 с.

ISBN 978-5-9903545-5-5

Монография «Морозостойкость бетона. Обзор» посвящена изучению проблемы морозостойкости бетона. Авторы рассматривают широкий круг вопросов, касающихся гипотез морозостойкости, методов испытаний, назначения марок по морозостойкости, а также технологии изготовления морозостойких бетонов и оценки состояния бетона в конструкциях после длительной эксплуатации в условиях морозного воздействия.

Монография предназначена для специалистов, занимающихся изучением бетона и железобетона, инженерно-технических работников проектных и строительных организаций, преподавателей и студентов соответствующих вузов.