Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2024, Том 16, № 6 / 2024, Vol. 16, Iss. 6 https://esj.today/issue-6-2024.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/79SAVN624.pdf

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Савин, С. Н. Экспериментальные исследования стыков арматуры на действие статической нагрузки / С. Н. Савин, В. В. Цыгановкин // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 6. — URL: https://esj.today/PDF/79SAVN624.pdf

For citation:
Savin S.N., Tsyganovkin V.V. Experimental studies of reinforcement joints on the effect of static load. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(6): 79SAVN624. Available at: https://esj.today/PDF/79SAVN624.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 624-2/-9

Савин Сергей Николаевич
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Профессор
Доктор технических наук, доцент
E-mail: snsavin@lan.spbgasu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9369-8214
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=426347

Цыгановкин Виктор Владимирович
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Ассистент
E-mail: vcyganovkin@lan.spbgasu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2412-1523
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1085064

Экспериментальные исследования стыков арматуры на действие статической нагрузки

Аннотация. С настоящее время строительная нормативная документация имеет очень ограниченное число вариантов исполнения стыков арматуры, что является недостаточным в ряде случае — при проектировании зданий и сооружений в условиях сейсмической активности, эксплуатационных динамических нагрузок. Так же, классические стыки в нахлест могут в разы повышать стоимость затрат на материалы при использовании арматуры большего диаметра. Арматура больше диаметра зачастую используют при строительстве атомных электростанций. Проблему индустриализации могут решить использование бесконтактных стыков — петлевых стыков, а также прямых или гнутых перепусков с различными анкерными устройствами. Однако применение данных решений сдерживается из-за отсутствия нормативной-технической базы для проектирования данных стыков при разработке конструктивных решений. В статье представлены испытания различных стыков под статическую нагрузку. Рассмотрены различные варианты стыков с последующим сравнительным анализом. Разработана методика испытаний образцов из монолитного железобетона с различным типом стыка арматурных стрежней. Разработана конечно-элементная модель с описанием граничных условий. Выявлены отдельные явления по обжатию бетона при использовании петлевых стыков. Выявлено изменение напряженно-деформированного состояния арматурных стержней при различном исполнении стыка. Получены результаты по напряженно-деформированному состоянию

арматуры в бетоне при различном варианте стыка. Установлено, что использование новых видов стыков способствует повышению скорости по производству монолитных работ на стройплощадках.

Ключевые слова: петлевые стыки в бетоне; муфтовые соединения; напряженно-деформированное состояние стыков; испытание стыков; стык Передерия; напряженное деформированное состояние петлевого стыка; обжатие бетона

Введение

Постановка настоящих исследований обусловлена острой необходимостью расширения на объектах атомного энергетического строительства номенклатуры стыков рабочей арматуры с целью снижения трудоемкости их изготовления и ускорения сроков строительства без ущерба надежности и безопасности АЭС.

Возможности применения «бесконтактных» соединений арматурных конструкций (типа петлевых стыков, а также прямых или гнутых перепусков с различными анкерными устройствами) сдерживаются из-за отсутствия или неполноты нормативно-методической базы для расчета и проектирования этих конструкций [1–5].

Опыт возведения сооружений из монолитного бетона показал, что принятые традиционные конструктивные решения и способы их возведения практически не поддаются индустриализации. Сокращение сроков строительства и ускорение ввода в эксплуатацию таких сооружений может быть достигнуто как путем повышения уровня организации строительства, так и внедрением прогрессивных конструкций и индустриальных методов возведения.

Однако, внедрение новых конструктивных решений в практику проектирования, а, следовательно, и реализация оптимизированных конструкций при строительстве сооружений во многом затруднено из-за отсутствия достаточной информации по расчету и испытаниям данных соединений [6–10].

Целью проводимых исследований является научно-техническое обеспечение проектов железобетонных конструкций зданий и сооружений АЭС для индустриальных методов строительства.

1. Методы

Испытание опытных моделей производилось в камере объемного нагружения, входящей в состав существующего гидросилового стенда. Размеры камеры 8,0×6,0×3,5 м. Камера снабжена подвижной боковой стенкой и покрытием. Боковая подвижная стенка сформирована из 18 металлических пластин, расположенных в двух уровнях, каждая из которых соединена с гидродомкратом. Домкраты имеют ход до 1,0 м и позволяют создать максимальное суммарное боковое усилие до 2 700 тс. Крепления домкратов к платинам и стенке выгородки стенда оснащены шаровыми опорами с углом поворота до 150. Максимальное усилие на одном домкрате 150 тс. Общий вид камеры представлен на рисунке 1.

Модели были запроектированы и изготовлены на производственной площадке «Управления промышленных предприятий». Размеры моделей 4 600×1 800×400 мм. Заявленный изготовителем класс прочности бетона железобетонных моделей — В25. Основной целью исследования было сравнение жесткостной и прочностной характеристик железобетонной модели использующей стык арматуры на обжимных муфтах, с моделью, использующей стык с петлевыми выпусками (стык Передерия) в двух исполнениях [9; 10]. На рисунках 2–4 соответственно изображены муфтовый стык, стыки с петлевым выпуском без относительного поперечного смещения петель и с относительным смещением петель.

Рисунок 1. *Силовая камера, вид сверху (фото авторов)*

Рисунок 2. *Муфтовый стык арматуры (фото авторов)*

Рисунок 3. *Муфтовый стык арматуры (фото авторов)*

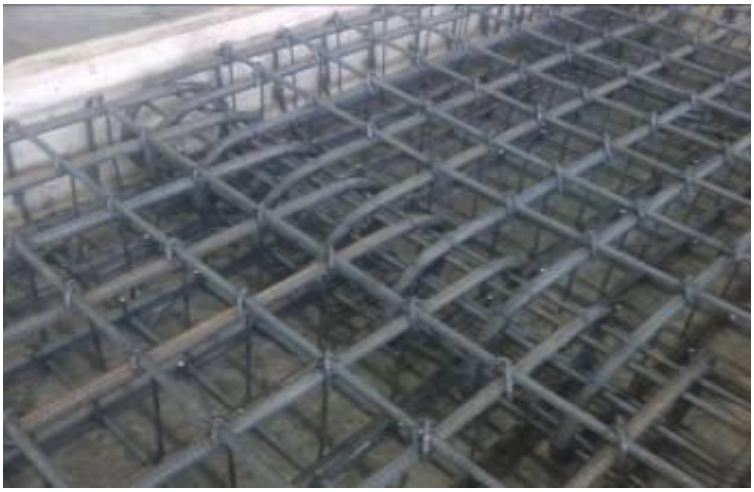

Рисунок 4. *Петлевой стык с относительным сдвигом петель (фото авторов)*

Система управления гидроаккумуляторов домкратов обеспечивает десять ступеней автоматического поддержания давления.

При этом возможна реализация нескольких видов нагружения: равномерного по всей поверхности стенки и локального (симметричного, не симметричного) при подаче давления в одиночные или объединенные в группу домкраты для имитации заданного распределения

испытательных нагрузок. В целом установка обеспечивает возможность испытания конструкций и элементов конструкций при воспроизведении различных видов нагружения, в том числе, высокой интенсивности.

Испытываемые модели загружались полосовой нагрузкой от четырех домкратов через распределительную траверсу. Схема нагружения соответствовала чистому изгибу; расстояние между нагрузочными площадками было равно 0,9 м, а расстояние от нагрузочной до опорной площадки 1,8 м. Во время опытов производилась регистрация напряженно-деформированного состояния модели с использованием тросиковых датчиков перемещения и тензорезисторов. На рисунке 5 изображена схема расстановки датчиков на моделях, а на рисунке 6 — модель, установленная внутри силовой камеры.

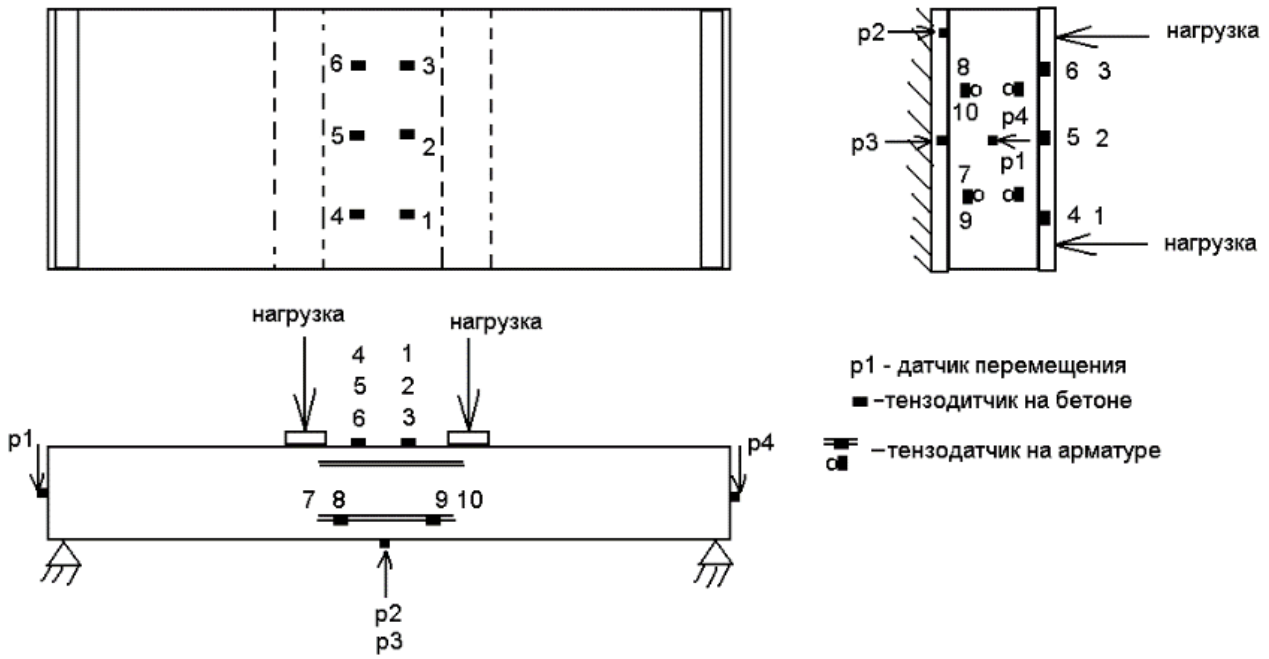

Рисунок 5. *Схема расстановки датчиков на испытанных моделях (фото авторов)*

Рисунок 6. *Размещение модели в силовом стенде (фото авторов)*

Для идентификации испытанных плит-образцов уточним введенные ранее термины и обозначения в соответствии с фактическими данными, представленные на рисунке 7.

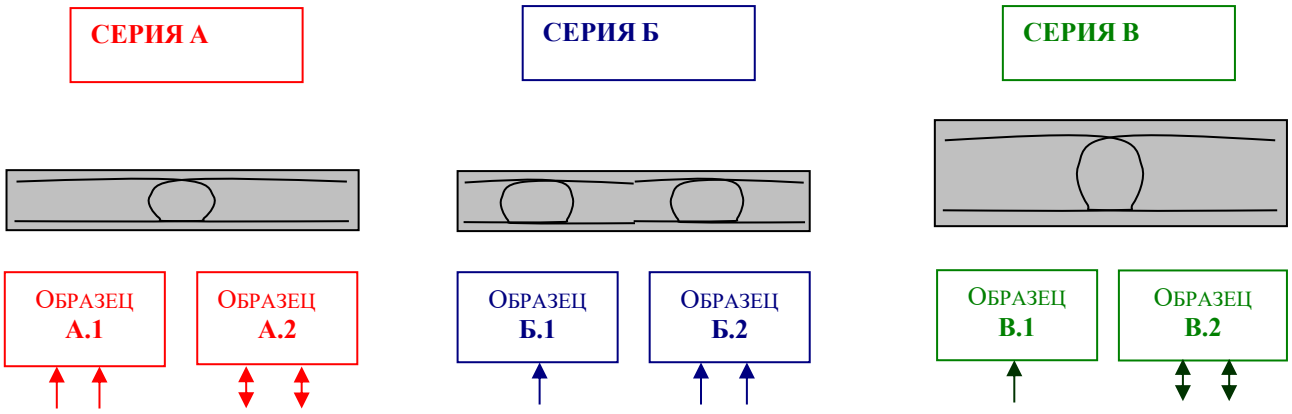

Рисунок 7. *Структурная схема испытаний (изображение авторов)*

Серия А. Линейный элемент, содержащий один петлевой стык, арматура Ø28А400, размеры 4 700×800×400, представлен образцом А.1 (класс бетона В25), подвергавшемся испытаниям по четырех точечной схеме нагружения на статическую ступенчатую нагрузку, и образцом А.2 (класс бетона В30), подвергавшемся испытаниям по четырех точечной схеме нагружения на ступенчатую знакопеременную статическую нагрузку. (Осевая прочность бетона 38÷43 МПа).

Серия Б. Линейный элемент, содержащий два петлевых стыка, арматура Ø28А400, размеры 4 700×800×400, представлен образцом Б.1 (класс бетона В20), подвергавшемся испытаниям по трех точечной схеме нагружения на статическую ступенчатую нагрузку, и образцом Б.2 (класс бетона В30), подвергавшемся испытаниям по четырех точечной схеме нагружения на статическую ступенчатую нагрузку. (Осевая прочность бетона 29÷42 МПа).

Серия В. Линейный элемент, содержащий один петлевой стык, арматура Ø28А400, размеры 4 700×800×400, представлен образцом В.1 (класс бетона В35), подвергавшемся испытаниям по четырех точечной схеме нагружения на статическую ступенчатую нагрузку, и образцом В.2 (класс бетона В35), подвергавшемся испытаниям по четырех точечной схеме нагружения на ступенчатую знакопеременную статическую нагрузку. (Осевая прочность бетона 45÷48 МПа).

Для оценки эффективности использования такого рода материалов, было выполнено численное моделирование усиленной и неусиленной железобетонной конструкции, имеющей стык Передерия.

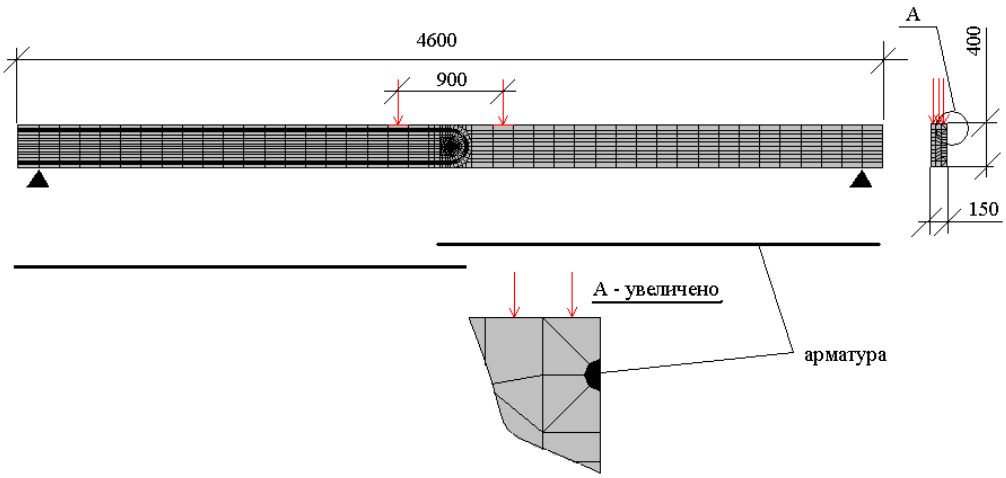

Рисунок 7. *Конечноэлементная модель фрагмента железобетонной плиты со стыком Передерия (фото авторов)*

Моделирование выполнялось методом конечных элементов с помощью российского программного средства «Зенит-95». Объектами моделирования был выбраны упрощенные фрагменты испытанных железобетонных плит. На рисунке 7 изображена модель с арматурным стыком Передерия.

При проведении численного моделирования физико-механические свойства арматуры соответствовали Кл. А-Ш, а конечные элементы, моделирующие бетон, имели свойства соответствующие тяжелому бетону В30.

Результаты

Для образцов Серии А (линейный элемент, содержащий один петлевой стык, бетон В25÷В30, арматура А400, размеры 4 700×800×400) сопоставление диаграмм нагружения позволяет утверждать, что:

- Петлевой стык в случае статического нагружения по схеме четырехточечного изгиба не имеет характерной для равнопрочного стыка точки «срыва» нагрузки, соответствующей моменту разрыва арматуры. Его диаграмма «нагрузка — прогиб» носит плавный характер с небольшим снижением максимальной нагрузки при значительных прогибах.
- Для случая повторного знакопеременного нагружения с последующим разрушением образца (А.2) диаграмма «нагрузка — прогиб» в целом близка к диаграмме для А1, но максимальная нагрузка на 18 % ниже.

Для образцов Серии В (линейный элемент, содержащий один петлевой стык, бетон В35, арматура А500, размеры 4 700×800×400) сопоставление диаграмм нагружения позволяет утверждать, что:

- Петлевой стык в случае статического нагружения по схеме четырехточечного изгиба так же как и для Серии А, не имеет характерной для равнопрочного стыка точки «срыва» нагрузки, соответствующей моменту разрыва арматуры. Его диаграмма «нагрузка — прогиб» носит плавный характер с резким переходом в зону существенных прогибов при относительно больших усилиях.
- Для случая повторного знакопеременного нагружения с последующим разрушением образца В.2 диаграмма «нагрузка — прогиб» практически совпадает с диаграммой для В1, но максимальная нагрузка на 8÷13 % ниже, а также ярче выражен спад нагрузки при значительном разрушении образца.

Для образцов Серии Б (линейный элемент, содержащий два петлевых стыка, бетон В20÷В30, арматура А500, размеры 4 700×800×400) сопоставление диаграмм нагружения позволяет утверждать, что:

- Петлевой стык в случае статического нагружения по схеме четырехточечного изгиба более «податлив», чем для Серии А, не имеет точки «срыва» нагрузки и обладает возможностью значительно деформироваться;
- В случае испытания по трехточечной схеме изгиба (приложения сосредоточенной нагрузки в центре плиты) образец был разрушен вне зоны петлевого стыка.

Испытания показали, что предельный изгибающий момент, воспринимаемый сечением железобетонной плиты с обжимными муфтами на арматуре, составил 342 тс*м, а для плит со стыком Передерия — 280 тс*м. После достижения максимальной нагрузки плиты с петлевым выпуском показали плавное снижение своего сопротивления изгибу и продолжали работу

вплоть до исчерпания возможностей стенда. В отличие от плит со стыком Передерия, плита с муфтовым соединением арматуры разрушилась резко, разрушение было вызвано разрывом растянутой арматуры около муфт.

В результате обработки опытных данных было установлено, что максимальные растягивающие напряжения на внешней поверхности растянутой арматуры на 25 % больше у арматуры, соединенной муфтами. Это хорошо согласуется с основным результатом эксперимента: предельный изгибающий момент для плиты с муфтовыми соединениями на 22 % больше по отношению к предельному моменту для плит со стыком Передерия.

Результаты испытаний железобетонных образцов с петлевыми стыками стержневой арматуры при кратковременном динамическом нагружении также показали их высокую устойчивость при интенсивных многократных и разовых воздействиях.

Механизм такой устойчивости к динамическим и статическим нагрузкам во многом определяется спецификой работы петлевого стыка, когда интенсивные нагрузки, способные вызвать значительные деформации, компенсируются «проворачиванием» крыльев плиты вокруг бетонного сердечника внутри петлевого стыка. Этот механизм хорошо иллюстрируется записью показаний тензодатчиков, выполненных на арматурных стержнях вблизи зоны стыка. На рисунке 8 отчетливо видно снижение (ступенчатое) напряжения при «проворачивании» арматуры вокруг сердечника.

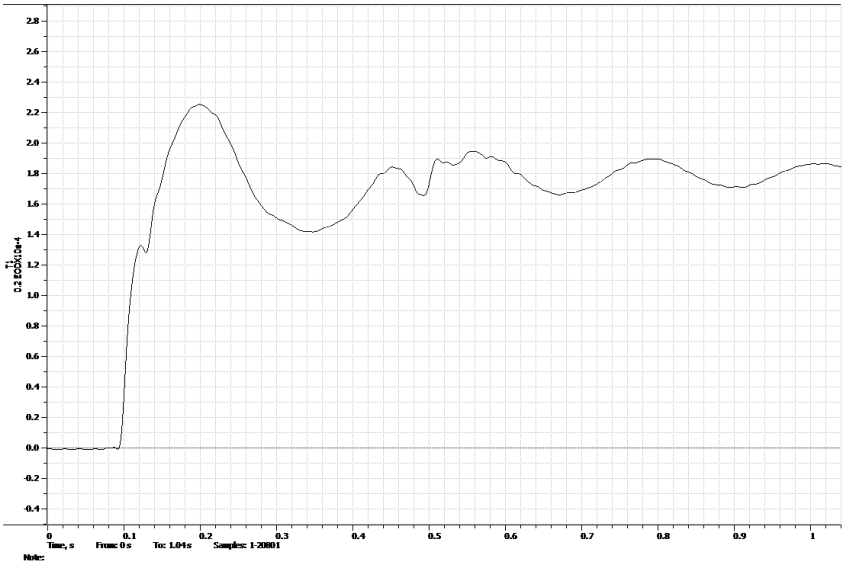

Рисунок 8. *Запись показаний тензодатчиков, выполненных на арматурных стержнях вблизи зоны стыка (фото авторов)*

Наличие углеволокна на растянутой зоне бетона привело к повышению жесткости исследуемого элемента на 30 % и снижению напряжения в арматуре на 7 % по отношению к модели без усиления. Результаты численного моделирования свидетельствуют о перспективности исследования усиления сечений железобетонных элементов, имеющих стык Передерия, высокомодульным внешним армированием.

Проведенные исследования по экспериментальной проверке прочности, трещиностойкости и жесткости экономичных вариантов стыков продольной арматуры, несмотря на ограниченное количество испытанных образцов, позволили в целом достигнуть поставленной цели — дать ответ на вопрос о работоспособности стыка Передерия в конструкциях реальных масштабов, применяемых при строительстве сооружений.

Сравнительная оценка параметров диаграммы «нагрузка — перемещение» для испытуемых образцов стыка Передерия показала, что в варианте стыка с тангенциальным смещением петель, уровень нагрузки выше на 3÷5 % вплоть до ее предельного значения, когда для обоих вариантов стыка максимальная нагрузка совпадает.

Наиболее значимым следует считать результат, полученный при исследовании зоны стыка образцов после нагружения. Удалось установить, что внутри арматурной петли образуется «обжатая» зона бетона без заметных повреждений, которая позволяет исследуемой конструкции сохранять несущую способность при значительных прогибах под нагрузкой, в то время как типовой муфтовый стык резко теряет несущую способность при разрыве продольной арматуры. Результаты оценки усилий в продольной арматуре для обоих типов стыков также показывают, что максимальные усилия в арматуре для стыка Передерия на всем участке действия нагрузки на 25 % ниже, чем для муфтового стыка.

Очевидно также, что разработка конструкций усиления петлевого стыка не представляется сложной проблемой и, в случае необходимости, может быть решена применением внешнего армирования материалами на основе углеволокна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мишуев А.В., Казеннов В.В., Хуснутдинов Д.З. Взрывная опасность для АЭС, запроектированных и построенных в России без учета взрывной опасности. журнал «Пожаровзрывобезопасность» № 7, 2011, С. 21–26.
2. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Безопасность атомных электрических станций при экстремальных внешних воздействиях. междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера», № 2, 2010, 197–213.
3. M.V. Ramana. Nuclear power: economic, safety, health, and environmental issues of near-term technologies. annual review of environment and resources. 2009, Vol. 34.
4. Зенин С.А., Кудинов О.В., Кудяков К.Л., Юрин Е.Ю., Хлебников С.К. Прочность нормальных сечений внецентренно сжатых железобетонных конструкций с петлевыми стыками арматуры. Подготовка и проведение экспериментальных исследований. Вестник НИЦ «Строительство». 2023;39(4):28–38. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4(39)-28-38. EDN: HHAFTY.
5. Дорофеев В.С., Мишутин А.В., Петраш С.В., Шеховцов И.В. К вопросу численного исследования работы петлевого стыка // Сб. тр. 74-ї науково-техн_чної конференц_ї професорсько-викладацького складу академ_ї. Одесса, 2018. С. 252–253.
6. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бобров В.В. [и др.]. Петлевые стыки стержневой арматуры: история развития, проблемы и актуальность // Строительство и реконструкция. 2022. № 6. С. 4–11. doi: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-4-11.
7. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бобров В.В., Бамматов А.А., Квасников А.А., Мартьянов К.В., Пугачев Б.А. Испытания элементов железобетонных конструкций с петлевыми стыками арматуры. Промышленное и гражданское строительство. 2023;(6):24–30. https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.06.24-30.
8. Дорофеев В.С., Малахов В.В. К вопросу о напряженно-деформируемом состоянии петлевых стыков изгибаемых элементов // В_сник ОДАБА. 2014. Вып. 54. С. 104–109.

9. Joergensen H.B., Hoang L.C. Tests and limit analysis of loop connections between precast concrete elements loaded in tension [Испытания петлевых соединений между сборными железобетонными элементами на растяжение] // Engineering Structures. 2013. Vol. 52. Pp. 558–569.

10. Sшrensen J.H. et al. Tensile capacity of U-bar loop connections with precast fiber reinforced dowels [Прочность на растяжение петлевых соединений U-образных стержней со сборными дюбелями, армированными волокном] // Fib Symposium 2016: Performance-based approaches for concrete structures: Proc. Technical University of Denmark, 2016. Pp. 102–114.

Savin Sergei Nikolaevich
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: snsavin@lan.spbgasu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9369-8214
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=426347

Tsyganovkin Viktor Vladimirovich
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: vcyganovkin@lan.spbgasu.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2412-1523
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1085064

Experimental studies of reinforcement joints on the effect of static load

Abstract. Currently, the construction regulatory documentation has a very limited number of options for the design of reinforcement joints, which is insufficient in some cases when designing buildings and structures in conditions of seismic activity and operational dynamic loads. Also, classic overlapping joints can significantly increase the cost of materials when using larger diameter fittings. Fittings larger than the diameter are often used in the construction of nuclear power plants (NPP). The problem of industrialization can be solved by using contactless joints — loop joints, as well as straight or curved bypasses with various anchoring devices. However, the use of these solutions is hampered by the lack of a regulatory and technical framework for the design of these joints in the development of structural solutions. The article presents tests of various joints under static load. Various joint options are considered, followed by a comparative analysis. A methodology for testing samples of monolithic reinforced concrete with different types of joints of reinforcement bars has been developed. A finite element model with a description of boundary conditions has been developed. Individual phenomena on concrete compression when using loop joints have been identified. A change in the stress-strain state of reinforcement bars with different joint designs has been identified. Results have been obtained on the stress-strain state of reinforcement in concrete with different joint options. It has been established that the use of new types of joints helps to increase the speed of monolithic work at construction sites.

Keywords: loop joints in concrete; coupling joints; stress-strain state of joints; joint testing; joint Perederia; stress-strain state of compressed concrete; FEM when calculating joints