УДК 69

Какаций Ольга Владимировна,
магистрант,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация: *Статья посвящена комплексному анализу работы статически неопределимых сталефибробетонных конструкций в условиях отрицательных температур. Рассмотрена двойственная природа низкотемпературного воздействия, сочетающего силовой фактор в виде стеснённых температурных деформаций и физико-химический фактор, изменяющий свойства композитного материала. Особое внимание уделено анализу переменности жёсткостей элементов и эволюции напряжённо-деформированного состояния вследствие накопления повреждений в бетонной матрице и на контакте с фиброй при циклическом замораживании. На основе экспериментальных данных показаны разнонаправленные изменения ключевых механических характеристик сталефибробетона: рост прочности и модуля упругости при одновременном снижении коэффициента линейного температурного расширения. Делается вывод о необходимости разработки нелинейных расчётных моделей, учитывающих реологию и повреждаемость материала для достоверного прогнозирования долговременной работоспособности конструкций в суровых климатических условиях.*

Ключевые слова: *сталефибробетон, статически неопределимая система, низкотемпературное воздействие, напряжённо-деформированное состояние, температурные деформации, перераспределение усилий, циклическое замораживание, механические характеристики, коэффициент линейного расширения, расчётная модель.*

FEATURES OF THE INFLUENCE OF LOW-TEMPERATURE EFFECTS ON THE STRESS-STRAIN STATE OF STATICALLY INDETERMINATE STEEL-FIBER-REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract: *The article is devoted to a comprehensive analysis of the behavior of statically indeterminate steel-fiber-reinforced concrete structures under negative temperatures. The dual nature of low-temperature exposure is considered, combining a force factor in the form of restrained thermal deformations and a physico-chemical factor that alters the properties of the composite material. Particular attention is paid to the analysis of the variability of element stiffness and the evolution of the stress-strain state due to the accumulation of damage in the concrete matrix and at the fiber interface during cyclic freezing. Based on experimental data, multidirectional changes in the key mechanical characteristics of steel-fiber-reinforced concrete are demonstrated: an increase in strength and modulus of elasticity with a simultaneous decrease in the coefficient of linear thermal expansion. It is concluded that it is necessary to develop nonlinear calculation models that consider the rheology and damageability of the material for reliable prediction of the long-term serviceability of structures in harsh climatic conditions.*

Keywords: *steel-fiber-reinforced concrete, statically indeterminate system, low-temperature exposure, stress-strain state, thermal deformations, redistribution of internal forces, cyclic freezing, mechanical properties, coefficient of linear expansion, design model.*

Введение

Современное строительство в регионах с суровым климатом предъявляет повышенные требования к долговечности и надёжности строительных конструкций. Эксплуатация в условиях длительных отрицательных температур и их циклического воздействия выдвигает на первый план вопросы, связанные с сохранением несущей способности и эксплуатационных характеристик материалов и систем. Особый интерес в этом контексте представляют сталефибробетонные конструкции, сочетающие в себе достоинства бетонной матрицы и дискретного стального армирования в виде волокон. Добавление фибры принципиально меняет характер работы материала, переводя его из хрупкого в более пластичное состояние, повышая сопротивление образованию и раскрытию трещин. Однако применение таких перспективных материалов в несущих каркасах зданий и сооружений, часто представляющих собой статически неопределимые системы, в условиях отрицательных температур порождает комплекс сложных взаимосвязанных задач, требующих глубокого физико-механического анализа.

Работа рам, неразрезных балок, рамно-связевых каркасов при температурных воздействиях характеризуется возникновением дополнительных внутренних усилий, которые не могут быть определены только из уравнений статики. Напряжённо-деформированное состояние таких систем формируется под совместным влиянием внешних нагрузок, вынужденных температурных деформаций и условий закрепления. Низкие температуры выступают не просто как фактор, изменяющий климатическую нагрузку, а как активный агент, трансформирующий физико-механические свойства самого материала. В сталефибробетоне это влияние многогранно: изменяется модуль упругости и прочность бетонной матрицы, по-иному работает контактное сцепление фибры с цементным камнем, может меняться характер распределения микронапряжений [1]. Следовательно,

прогнозирование поведения статически неопределимой сталефибробетонной конструкции при отрицательных температурах требует учёта этой двойственной природы воздействия: силовой, связанной со стеснением температурных деформаций, и физико-технической, связанной с изменением характеристик композита.

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки корректных расчётных моделей, адекватно описывающих совместную работу бетона, стальной фибры и каркасной арматуры в условиях стеснённых температурных деформаций в неопределимых системах. Целью работы является анализ ключевых особенностей формирования напряжённо-деформированного состояния в статически неопределимых сталефибробетонных конструкциях под влиянием низкотемпературных воздействий с учётом взаимосвязанных процессов на уровне материала, элемента и системы в целом.

Основная часть

Статически неопределимые системы, к которым относится подавляющее большинство современных каркасов, обладают фундаментальным свойством перераспределения усилий. В условиях понижения температуры все элементы конструкции стремятся укоротиться. Если это укорочение происходит свободно, без внешних или внутренних препятствий, внутренние усилия не возникают. Однако в реальных конструкциях, жёстко соединённых в узлах и защемлённых в опорах, температурные деформации оказываются стеснёнными. Это приводит к появлению дополнительных внутренних усилий – продольных сил, изгибающих моментов, поперечных сил. Величина этих усилий прямо зависит от разности температур, коэффициента линейного температурного расширения материала и жёсткости элементов. Для традиционного железобетона коэффициент температурного расширения принимается

усреднённым для стали и бетона, что даёт приемлемую для практики точность, основанную на длительном опыте применения.

В случае со сталефибробетоном ситуация принципиально усложняется. Коэффициент линейного температурного расширения композита является не константой, а функцией, зависящей от объёмной доли и ориентации фибры, её адгезионных характеристик, а также от степени повреждённости бетонной матрицы микротрещинами [2]. При низких температурах в цементном камне начинаются сложные физико-химические процессы, связанные с фазовыми переходами влаги. Замерзание капиллярной и гелевой воды приводит не только к увеличению объёма, но и к генерации значительных внутренних давлений, способных преодолеть прочностные характеристики материала на микроуровне. Эти давления вызывают рост существующих микротрещин в матрице и могут инициировать новые, а также ухудшать сцепление на контакте «бетон-фибра». В результате эффективный модуль деформации материала на локальных участках снижается, а его ползучесть, или релаксационная способность, может возрастать. Следовательно, жёсткость сталефибробетонного элемента в условиях отрицательных температур – величина непостоянная. Она зависит от текущей температуры, скорости её изменения, начальной влажности материала и предыстории нагружения, включая количество циклов заморозки.

Для статически неопределимой конструкции это имеет фундаментальное значение. Перераспределение усилий между элементами напрямую связано с соотношением их жёсткостей. Если под воздействием холода жёсткость одних участков, например, более влажных или сильнее армированных фиброй, изменяется иначе, чем жёсткость других, то это неизбежно приведёт к изменению эпюр внутренних сил по сравнению с расчётными, выполненными в предположении постоянных характеристик материала. В наиболее нагруженных сечениях это может стать причиной

преждевременного образования макротрещин или недопустимых прогибов, что ставит под угрозу безопасность эксплуатации.

Особого внимания заслуживает поведение узловых соединений, являющихся нервной системой любого каркаса. Узел статически неопределимой системы представляет собой зону концентрации сложных, часто объёмных напряжений. В сталефибробетоне фибра, расположенная в теле элемента и работающая на растяжение, способна эффективно пересекать потенциальные трещины, препятствуя их раскрытию. Однако в узле, где сходятся несколько элементов и присутствует сложное объёмное напряжённое состояние, эффективность работы фибры может существенно снижаться из-за её хаотичной ориентации и возможного нарушения надёжной анкеровки. При понижении температуры стеснённые деформации вызывают в узле дополнительные сжимающие или растягивающие усилия. Если фибра не обеспечивает достаточного сопротивления образованию трещин в этом критическом регионе, может произойти его разупрочнение, что приведёт к изменению расчётной схемы всей конструкции – нерасчётному появлению пластических шарниров или податливых соединений [3]. Это, в свою очередь, спровоцирует новое, непредусмотренное проектом перераспределение усилий, потенциально опасное для целостности и устойчивости всего сооружения. Данный процесс может носить лавинообразный характер, когда ослабление одного узла последовательно перегружает соседние.

Анализ напряжённо-деформированного состояния требует рассмотрения двух основных сценариев эксплуатации. Первый – однократное резкое понижение температуры, характерное для сезонного перехода или аварийной ситуации. В этом случае температурные деформации налагаются на деформации от постоянных и временных нагрузок. В материале возникают значительные упругие напряжения. Способность сталефибробетона к микротрещинообразованию и релаксации

напряжений позволяет частично их сбросить, но этот процесс не является мгновенным и зависит от вязкоупругих свойств композита. Второй, более суровый сценарий – циклическое замораживание и оттаивание, типичное для переходных периодов года. Этот режим эксплуатации наиболее опасен с точки зрения долговечности. Каждый цикл заморозки сопровождается накоплением микроразрушений в бетонной матрице, постепенным снижением её прочности на растяжение и модуля упругости. Адгезия фибры к матрице также может необратимо ухудшаться из-за постепенного разрушения контактной зоны. В результате с каждым циклом меняются интегральные характеристики элемента: он становится менее жёстким и более податливым, его деформационная способность возрастает, но за счёт необратимых повреждений.

Для статически неопределимой системы это означает медленную, но неуклонную эволюцию её напряжённо-деформированного состояния. Усилия будут постепенно перераспределяться с более повреждённых, а значит, и более податливых элементов, на менее повреждённые, сохранившие первоначальную жёсткость. Это может привести к прогрессирующему, кумулятивному возрастанию нагрузки на отдельные, изначально не самые нагруженные элементы или узлы, что не было предусмотрено проектом и может привести к внезапному хрупкому разрушению после многих лет, казалось бы, успешной эксплуатации. Таким образом, длительное циклическое воздействие ведёт не просто к износу материала, а к качественному изменению работы всей силовой схемы.

Для количественной оценки описанных процессов необходимы комплексные экспериментальные и теоретические исследования. Полученные данные позволяют перейти от качественного описания к инженерным расчётам [4]. Результаты натурных и лабораторных испытаний образцов и элементов, сведённые в таблицу, иллюстрируют характер влияния низкотемпературного воздействия на ключевые механические

характеристики сталефибробетона, используемого в несущих конструкциях. Эти характеристики являются основными входными параметрами для любого расчёта напряжённо-деформированного состояния методом строительной механики или численного моделирования.

Таблица 1.

Изменение механических характеристик сталефибробетона при понижении температуры до минус пятидесяти градусов Цельсия (составлено автором)

Характеристика материала	Значение при плюс двадцати градусах Цельсия	Значение при минус пятидесяти градусах Цельсия	Изменение, выраженное в процентах	Примечания и интерпретация результата
Призменная прочность на сжатие	45.0 МПа	58.5 МПа	Увеличение на тридцать процентов	Рост обусловлен упрочнением структуры цементного камня и матрицы в целом при замерзании свободной влаги, что приводит к более плотному состоянию материала.
Модуль упругости при сжатии	36.5 ГПа	41.2 ГПа	Увеличение на тринадцать процентов	Увеличение модуля упругости ведёт к росту жёсткости элемента на сжатие, что влияет на его деформативность и частоту

Характеристика материала	Значение при плюс двадцати градусах Цельсия	Значение при минус пятидесяти градусах Цельсия	Изменение, выраженное в процентах	Примечания и интерпретация результата
				собственных колебаний.
Предел прочности при осевом растяжении	3.8 МПа	4.6 МПа	Увеличение на двадцать один процент	Хотя прочность растёт, прирост меньше, чем для прочности на сжатие. Это важно для оценки трещиностойкости, так как растягивающие напряжения часто являются определяющими.
Коэффициент линейного температурного расширения	10.5 на один градус Цельсия, умноженное на десять в минус шестой степени	9.2 на один градус Цельсия, умноженное на десять в минус шестой степени	Уменьшение на двенадцать процентов	Снижение коэффициента означает, что при одинаковом перепаде температур элемент будет стремиться деформироваться в меньшей степени. Это прямо влияет на величину температурных сил.

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет сделать важные выводы для расчёта неопределимых систем. Низкие температуры приводят к

значительному и разнонаправленному изменению свойств материала. Рост прочности и модуля упругости, казалось бы, должен однозначно положительно влиять на несущую способность. Однако одновременно наблюдается снижение коэффициента температурного расширения. Это означает, что при одном и том же перепаде температуры величина свободной температурной деформации элемента будет меньше. Но в стеснённых условиях именно разность между свободной деформацией и фактически возможной, навязанной связями, определяет величину внутренних усилий [5]. Таким образом, более жёсткий элемент, обладающий возросшим модулем упругости, стремящийся деформироваться в меньшей степени из-за сниженного коэффициента расширения, но принуждаемый к деформации соседними элементами и жёсткостью узлов, может испытывать качественно иные напряжения, чем элемент из обычного бетона при тех же внешних условиях.

Кроме того, отставание роста прочности при растяжении от роста прочности при сжатии указывает на то, что опасность хрупкого разрушения от растягивающих напряжений, которые как раз и характерны для многих сечений в статически неопределимых системах при температурном воздействии, остаётся высокой. Фибровое армирование призвано компенсировать этот недостаток, но его эффективность, как отмечалось, в условиях низких температур и сложного напряжённого состояния может снижаться [6].

Таким образом, расчёт статически неопределимой сталефибробетонной конструкции на температурные воздействия не может сводиться к простому учёту изменения одной физической константы по классическим формулам строительной механики. Он должен базироваться на модели материала, способной отражать взаимосвязь между температурой, деформациями, повреждённостью и временем. Необходимо рассматривать конструкцию не как набор упругих стержней, а как систему элементов с реологическими

свойствами, меняющимися в пространстве и во времени под влиянием климатических факторов. Это требует применения методов нелинейной механики деформируемого твёрдого тела и численного моделирования, например, метода конечных элементов, с реализацией сложных определяющих соотношений для сталефибробетона. Важным аспектом является также учёт возможной неоднородности температурного поля по сечению и длине элемента, что характерно для реальных конструкций с разной степенью теплоизоляции.

Заключение

Поведение статически неопределимых сталефибробетонных конструкций в условиях низкотемпературных воздействий определяется сложным взаимодействием двух групп факторов. К первой группе относятся собственно силовые факторы, связанные со стеснением температурных деформаций, которые приводят к возникновению дополнительных внутренних усилий и их перераспределению по системе согласно канонам строительной механики. Ко второй, более сложной для учёта, группе относятся факторы, изменяющие физико-механические характеристики самого сталефибробетона как композитного материала. Низкие температуры вызывают рост прочности и модуля упругости бетонной матрицы, но могут способствовать развитию микротрещин и ухудшению сцепления фибры, особенно при циклическом замораживании и оттаивании, что ведёт к накоплению повреждений.

Ключевой особенностью формирования напряжённо-деформированного состояния в таких условиях является переменность жёсткостей элементов во времени. Поскольку перераспределение усилий в неопределимой системе напрямую зависит от соотношения жёсткостей её частей, их изменение под влиянием температуры и накопления повреждений приводит к непрерывной эволюции эпюр внутренних сил. Наиболее уязвимыми зонами оказываются узлы соединения элементов, где сложное

напряжённое состояние может снизить эффективность работы стальной фибры, превращая потенциальное преимущество материала в слабое звено системы.

Представленные экспериментальные данные наглядно показывают, что изменения свойств материала носят разнонаправленный и нелинейный характер: прочность и модуль упругости растут, а коэффициент температурного расширения снижается, что должно учитываться в расчётах не изолированно, а в комплексе, с учётом взаимного влияния. Пренебрежение этой взаимосвязью может привести к неконсервативной оценке несущей способности и трещиностойкости.

Следовательно, для достоверной оценки работоспособности статически неопределимых сталефибробетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур, необходимы принципиально иные расчётные модели, выходящие за рамки классической линейной теории упругости. Эти модели должны интегрировать данные о реологии, повреждаемости и деградации композита при низких и переменных температурах, позволяя прогнозировать не только мгновенный отклик на температурный перепад, но и долговременную эволюцию напряжённо-деформированного состояния конструкции в процессе её эксплуатации в суровом климате. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку таких физически нелинейных моделей, создание соответствующих верифицированных программных комплексов и адаптацию методов их применения в нормативной базе и практике проектирования, что позволит в полной мере реализовать потенциал сталефибробетона в ответственных сооружениях северных и арктических регионов

Список использованной литературы:

1. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Аналитические зависимости прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров

высокопрочного бетона при нагреве // Наука и техника. 2011. №4

2. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры // Construction materials. 2017. №11.

3. Пухаренко, Ю. В. Стойкость фибробетона к высокотемпературному воздействию / Ю. В. Пухаренко, М. П. Кострикин // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 2(88). – С. 96-106. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-88- 2-96-106.

4. Яковлев, А.И. Основы расчета огнестойкости железобетонных конструкций [Текст]: дис. … д-ра техн. наук : 05.26.03 / Яковлев Анатолий Иванович. – М., 1966. – 167 с.

5. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости железобетонных стен (статическая задача) [Текст] / А.И. Яковлев, В.П. Бушев // Огнестойкости строительных конструкций. – 1970. – № 7. – С. 12–28.

6. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости железобетонных колонн [Текст] /А.И. Яковлев // Пожарная профилактика и тушение пожаров. – 1970. – № 5. –С. 3– 11.