

Аннотация

В статье рассматриваются предварительно напряженные элементы в металлических конструкциях, их историческое развитие, виды, преимущества и недостатки, а также особенности расчетов и перспективы применения. Проанализирована история развития концепции предварительного напряжения. Представлены основные типы предварительно напряженных металлических конструкций, включая балки, фермы, кабели и гибридные системы. Обсуждаются их характеристики, области применения и конструктивные преимущества, такие как повышение прочности, снижение деформаций и экономия материалов. Так же выполнен расчет с целью сравнения влияния на конструкцию элементов с предварительным напряжением, за основу взят новый аэропорт в г. Стамбул, а именно его витражные конструкции с применением предварительного напряжения

Ключевые слова: Предварительное напряжение, перемещения, напряженно-деформированное состояние

Введение

Предварительное напряжение — это метод создания внутреннего напряжения в конструктивных элементах с целью противодействия внешним нагрузкам. В металлических конструкциях это достигается посредством приложения начальных сил к материалу перед его эксплуатацией. Это позволяет снизить влияние растягивающих напряжений и увеличить устойчивость конструкции.

Применение предварительного напряжения в строительстве металлических конструкций предоставляет ряд преимуществ: более высокая прочность, экономия материала и снижение деформаций. Это особенно актуально для мостов, крыш, высотных зданий и других крупных сооружений, где важны высокие показатели прочности и долговечности.

Использование предварительно напряженных элементов в металлических конструкциях является достаточно давней идеей, но данный конструктивный прием остается по-прежнему актуальным.

Впервые такой способ увеличения работоспособности конструкции посредством искусственно созданных собственных напряжений возник еще в XIX веке. Это были проекты с предварительно напряженными элементами в чугунных и стальных мостах. [1]

Принцип работы и расчет предварительно напряженных конструкций

За счет создания искусственных внутренних напряжений преднапряженные металлические конструкции работают на этапе производства, монтажа или усиления. Эти напряжения снижают влияние внешних нагрузок на конструкцию, повышая её прочность, жесткость и долговечность. Основной принцип заключается в том, чтобы заранее создать такие внутренние силы, которые будут компенсировать или уменьшать негативное воздействие эксплуатационных нагрузок.

Группы предварительно напряженных металлоконструкций [1]:

- Конструкции для повышения прочности и устойчивости. В этой группе предварительное напряжение используется для увеличения прочностных характеристик и устойчивости конструкций. Это позволяет значительно повысить их способность выдерживать высокие нагрузки;
- Конструкции для увеличения жесткости и долговечности. Предварительное напряжение в этих конструкциях воздействует на II предельное состояние, в результате способствует повышению жесткости и долговечности;
- Конструкции, формирующие свойства первой и второй группы. Сочетаются преимущества обеих групп: повышенная прочность, устойчивость, жесткость и долговечность. Это позволяет использовать такие конструкции в условиях повышенных нагрузок;
- Конструкции с применением наклепа. Наклеп — это процесс упрочнения материала путем его пластической деформации. Конструкции этой группы используют наклеп для создания предварительных напряжений, что позволяет улучшить эксплуатационные характеристики элементов;

Каждая из этих групп имеет свои особенности и применяется в зависимости от требований к конструкции и условий её эксплуатации.

Расчет предварительно напряженных металлоконструкций в два этапа

Расчет предварительно напряженных металлоконструкций проводится в два основных этапа: создание предварительного напряжения и эксплуатация конструкции.

1. Этап создания предварительного напряжения

На этом этапе создаются внутренние напряжения в конструкции за счет различных методов (например, натяжение стержней или обжатие элементов). Основные характеристики этого этапа:

Усилия в затяжках: Во время создания преднапряжения происходит замена усилий напряжения на эквивалентные внешним силам. Регулировка усилий: Усилия в напрягаемых элементах регулируются в процессе натяжения, а усилия в других частях конструкции являются зависимыми переменными. Распределение нагрузок: Внутренние напряжения распределяются так, чтобы минимизировать воздействие внешних нагрузок, улучшая эксплуатационные характеристики конструкции.

2. Этап эксплуатации конструкции

На этапе эксплуатации конструкция уже находится под воздействием эксплуатационных нагрузок. Основные характеристики этого этапа: Неизвестные переменные: На этом этапе неизвестными переменными являются величина и координаты приложенных внешних нагрузок, а также прирост усилий во всех затяжках и элементах конструкции.

Приращение усилий: Изменение усилий в затяжках и других элементах конструкции рассчитывается с учетом внешних нагрузок. Используемые методы: Канонические уравнения метода сил и аналогичные матричные уравнения [1]

Способы создания предварительного напряжения

Для того чтобы создать предварительное напряжение [2] в металлоконструкциях используются различные методы, позволяющие эффективно распределять внутренние напряжения в элементах конструкции. Основные методы включают:

Предварительный упругий изгиб. Отдельные элементы конструкции изгибаются в упругом состоянии, а затем фиксируются сваркой в изогнутом положении. Этот метод используется для создания жестких и устойчивых конструктивных элементов, таких как балки;

Принудительное смещение опор. Во время монтажа опоры конструкции смещаются для получения усилий обратного знака и перераспределения моментов относительно внешней нагрузки. Это позволяет улучшить устойчивость конструкции;

Обжатие стержней и элементов. Предварительное напряжение создается путем обжатия растянутых, сжатых и изгибаемых стержней или целых элементов с использованием затяжек из высокопрочных материалов. Этот метод позволяет увеличить прочность и устойчивость конструкции;

Вытяжка элементов. Целые элементы или их отдельные стержни подвергаются предварительной вытяжке, что увеличивает область их упругой работы. Этот метод улучшает долговечность и сопротивляемость конструкции к внешним нагрузкам;

Завальцовка высокопрочной проволоки. Для создания в прокатных профилях дополнительных напряжения и для увеличения их устойчивости к нагрузкам в них вальцуют высокопрочную проволоку, которую натягивают предварительно;

Вантовые системы с использованием предварительного напряжения. Для обеспечения большей жесткости и восприятия сжимающих усилий применяют предварительное натяжение вантовой системы;

Гибкие стержни. Такие элементы как тросы, проволоки, арматуры и др. гибкие стержни для восприятия сжимающих усилий предварительно натягивают. Это в свою очередь снижает деформации конструкции под нагрузкой и повышает ее устойчивость.

Особенности напряженно деформированного состояния (НДС) в предварительно

Предварительно напряженные конструкции характеризуются тем, что в них искусственно создается начальное напряжение для того, чтобы противодействовать внешним нагрузкам [3]. Это позволяет оптимизировать работу конструкции и повысить её жесткость и устойчивость.

Предварительное напряжение — это особое состояние НДС, которое вводится в конструкцию заранее, до начала эксплуатации, с целью:

- Компенсации растягивающих напряжений: в конструкциях, подверженных растяжению (например, в тросах), предварительное напряжение помогает уменьшить их прогиб и снизить вероятность усталостных разрушений;
 - Увеличения жесткости: предварительное напряжение увеличивает устойчивость конструкции к деформациям под воздействием внешних сил;
 - Снижения колебаний: в сооружениях с большими пролетами предварительное напряжение снижает амплитуду колебаний при возникновении динамических нагрузок.
- Во время внедрения предварительно напряженных элементов [4] стоит учесть несколько факторов:
- Начальное напряжение: для того чтобы конструкция могла компенсировать будущие внешние воздействия необходимо определить требуемый уровень предварительного напряжения;
 - Перераспределение нагрузок: учет того, как предварительное напряжение изменит работу всей конструкции, перераспределяя усилия между элементами;
 - Остаточные деформации: даже после снятия нагрузки часть деформаций может остаться, что важно учитывать в расчете долговечности конструкции.

Пример расчета конструкции витражей с предварительно напряженными элементами

Расчет выполнен на примере существующей конструкции нового аэропорта в г. Стамбул, а именно витражная система с применением предварительно напряженных тросов элементов раскосов. Габариты конструкции составляют 18x24м., характеристики тросов преднапряжения: Модуль упругости (E) — 200ГПа, допустимое напряжение на растяжение — 1600МПа, диаметр троса — 12мм. Внешние нагрузки на конструкцию: Прикладываемая горизонтальная точечная нагрузка (3т) на верхний узел распорки для анализа работы преднапряжения, вес остекления с рамой: ~30 кг/м², собственный вес конструкции учтено программно.

Расчет выполнен в трех вариантах:

- В первом случае элементы раскосов не были задействованы (Рис. 1);
- Во втором элементы тросов установлены в конструкции, но без предварительного напряжения (Рис. 2);
- В третьем случае использовано предварительное напряжение всех тросов (Рис. 3).

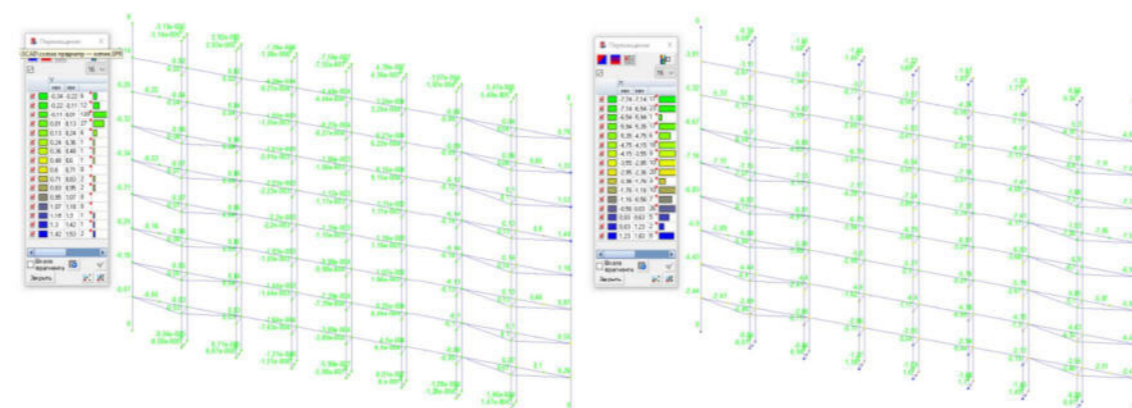


Рис. 1. Перемещения в витражной конструкции без использования тросов

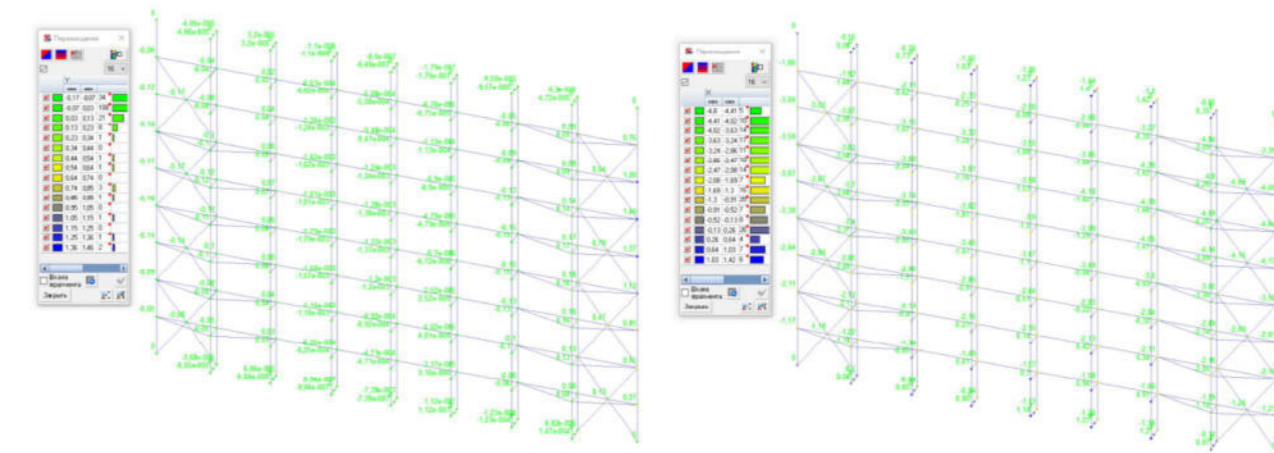


Рис. 2. Перемещения в витражной конструкции с использованием тросов без преднапряжения

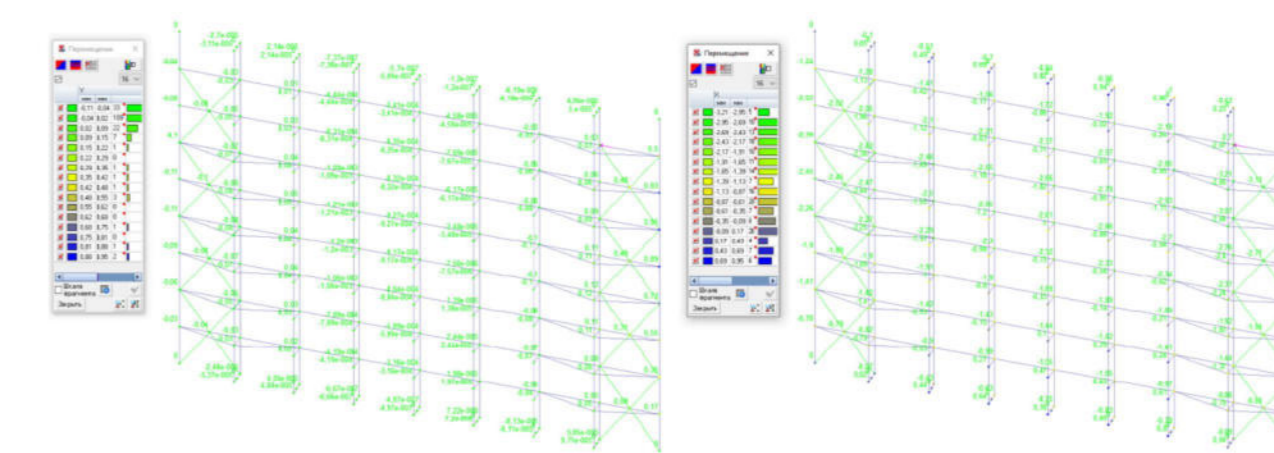


Рис. 3. Перемещения в витражной конструкции с использованием преднапряженных тросов

Вариант использования элементов в раскосах	Перемещения max по X (мм)	Перемещения max по Y (мм)
Без использования тросов	7,74	1,42
И использованием тросов без предварительного напряжения	4,8	1,36
Тросы с предварительным напряжением	3,21	0,88

Выводы и анализ полученных результатов

Предварительно напряженные металлические конструкции играют решающую роль в строительстве, особенно при создании крупных и ответственных объектов, таких как мосты, высотные здания, крыши стадионов и другие конструкции с обозначенными пролётами. Они обеспечивают ряд преимуществ перед энергосберегающими конструкциями благодаря улучшенным механическим характеристикам, устойчивости к нагрузкам и устойчивости.

По результатам выполненного сравнительного расчета можно сделать вывод, что применение предварительного напряжения уменьшает максимальные перемещения на 30-35%. Это в свою очередь показывает эффективность применение таких элементов т.к. в дальнейшем дает возможность оптимизации всей конструкции.

В будущем может продолжиться рост интереса к предварительно напряженным металлическим конструкциям, особенно с учетом развития технологий и появления новых материалов. Подобные конструкции продолжают играть ключевую роль в строительстве строительных объектов, где требуется сочетание прочности, надежности и экономической эффективности.

Таким образом, предварительно напряженные металлические конструкции имеют научную и практическую инновационность в современном строительстве, и их использование будет лишь расширяться с развитием новых методов и технологий

Библиографический список

1. Гайдаров Ю.В. Предварительно напряженные металлические конструкции / Стройиздат, 1971г. — 146 с.
2. Беленя Е.И. Предварительно напряженные металлические несущие конструкции / Госстройиздат, 1963. 324 с.
3. Михайлов В.В. Предварительно напряженные комбинированные и вантовые конструкции / 2002 г. — 255 стр.
4. Горев В.В. "Металлические конструкции" (том 3) / Москва "Высшая школа" 2002 год — 275с.
5. Беленя Е.И. Предварительно напряженные металлические несущие конструкции / Госстройиздат, 1975. 416 с
6. Сенькин Н.А. и др. 2019б. Анализ напряженно- деформированного состояния предварительно напряженной балки из стальных труб. Санкт-Петербург: СПбГАСУ.
7. Богорад Л.А., Барыба Я.В., Пермяков Б.М. Изучение возможности замены стальных канатов, применяемых при производстве строительного-монтажных работ, гибкой стальной лентой. — В кн.: Сб. науч.тр./МГМИ. — Магнитогорск, 1974, вып. 125, с. 25-29.
8. Воеводин А.А. Легкая стальная мачта шпренгельного типа. — Вестник связи, 1952, №5, с. 13-14.
9. Сенькин Н. А., Филимонов А. С. Взаимодействие конструктивных элементов в линейной цепи воздушной линии электропередачи // Жилищное строительство. 2024. № 1-2. С. 101-108.
10. Сенькин Н.А. Учет прогрессирующего обрушения при проектировании опор воздушных линий электропередачи // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4 (93). С. 37-46
11. Poddaeva O., Churin P., Loktev A.. STABILITY AND RELIABILITY OF LONG-SPAN BRIDGE STRUCTURES. Architecture and Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 65–75. DOI: 10.23968/2500-0055-2022-7-3-65-75.
12. Сенькин Н. А. Большие переходы вл 110-750 кв через водные пространства //ЭНЕРГОЭКСПЕРТ Учредители: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Вся электротехника». — №. 1. — С. 26-34.
13. Кравчук В. А., Кравчук Е. В. Развитие исследований предварительно напряженных строительных металлических конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 86-92
14. Volkov V. CONTROL OVER DISTRIBUTION OF CONSTRUCTION LOADS ON FOUNDATIONS OF TOWER BUILDINGS. Architecture and Engineering, Vol. 1, No. 4, pp. 42–45. DOI: 10.23968/2500-0055-2016-1-4-42-45