

К вопросу релаксации струны в струнном транспорте Юницкого (СТЮ)

1. Краткий исторический очерк

Первые сооружения, в которых релаксация напряжённых стальных конструкций могла оказать влияние на их долговечность и эксплуатационные характеристики, были: мост в Венеции, построенный в 1600 г. с применением металлических цепей; мост с использованием проволочных канатов и металлических пилонов, построенный в Англии в 1817 г.

За последние десятилетия в мире построены сотни висячих и вантовых мостов. Рекордные характеристики имеет мост "Акаси" (Япония): центральный пролёт 1991 м, диаметр несущего каната около 200 см, усилие натяжения каната - свыше 200 тыс. тонн.

2. Высокопрочная стальная проволока

Исходный материал для формирования вант и канатов висячих мостов - высокопрочная стальная проволока диаметром 2,5...7 мм, получаемая из заготовки диаметром до 10...12 мм путём многократного волочения через фильеры. На проволоку наносят антикоррозионное покрытие, чаще всего цинковое.

Проволоку обычно применяют с временным сопротивлением разрыву $\sigma_{вр}=18000$ кгс/см² и относительным удлинением при разрыве $\delta=4\%$.

Пучки (канаты) из параллельных проволок применяют в качестве напрягаемой арматуры железобетонных конструкций более 40 лет.

Высокопрочная холоднотянутая проволока с $\sigma_{вр}$ от 12000 до 19000 кгс/см², условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ от 10000 до 16000 кгс/см² изготавливается из углеродистой легированной катанки путём её специальной термической обработки (патентирования), холодного деформирования и последующего низкотемпературного отпуска.

Отечественной промышленностью выпускается арматурная сталь холоднокатанная с диаметром проволоки 3...8 мм. Характеристики такой проволоки, например, диаметром 3 мм по ГОСТ 7348-81 следующие: $\sigma_{вр}=18600$ кгс/см², $\sigma_{0,2}=14900$ кгс/см² (где 0,2 - заданный предел ползучести, т. е. длительное удлинение в процентах), $\delta=4\%$, номинальное усилие разрыва $P_b=1313$ кгс. Кроме этого, выпускается стальная проволока для канатов с временным сопротивлением разрыву до $\sigma_{вр}=26000$ кгс/см², а также канаты с разрывным усилием до 24000 кгс/см² [6].

В последние десятилетия получила распространение проволока, подвергнутая после волочения механо-термической обработке или стабилизации по технологии, разработанной фирмой "Самерсет" (Великобритания). Процесс стабилизации заключается в вытяжке стали до деформации около 1%, совмещённой с нагревом до температуры 350...400 °С. В результате существенно повышаются характеристики сопротивления стали малым пластическим деформациям ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,02}$ и т. п.) и снижаются потери напряжения от релаксации.

3. Высокопрочная проволока в строительных конструкциях

"...При существующих в отечественных нормах ограничениях прогибов величиной в 1/400 пролёта оказывается возможным использовать высокопрочную проволоку только до 2500...4000 кгс/см². Между тем наша промышленность выпускает стальную проволоку с пределом прочности 20000 кгс/см² и ожидается выпуск ещё более прочных материалов..." [2, стр. 17]. "...Если же допустить прогибы до 1/250, то можно поднять расчётные напряжения до 7400 кгс/см²..." [2, стр.181]. Там же приведены (стр. 193) расчёты висячих мостов с расчётными напряжениями в канате $R_k=10800, 13300$ и 20800 кгс/см². И делается вывод, что можно повышать низшую частоту колебаний мостов путём увеличения предварительного напряжения с одновременным использованием высокопрочных материалов.

"...Заводское изготовление канатных элементов из параллельных проволок освоено в Японии. Применяют канаты шестиугольного сечения из оцинкованной проволоки диаметром

5 мм с прочностью до 18500 кгс/см^2 , число проволок в канате обычно не превышает 154 из условия намотки на транспортный барабан. Канаты из параллельных проволок обладают рядом ценных качеств. Прежде всего, это повышенная прочность... Круглые проволоки можно получить с более высоким временным сопротивлением, чем фасонные; разрывное усилие каната в целом близко к суммарному разрывному усилию всех проволок. При равной площади сечения прочность каната увеличивается на 20...25%... Для канатов из параллельных проволок характерны высокие, а главное, стабильные характеристики упругости; модуль упругости каната близок к модулю упругости проволоки..." [1, стр.108].

При производстве железобетонных опор высоковольтных линий электропередач используют предварительно напряжённые пучки из высокопрочной проволоки класса ВрП диаметром 5 мм с предварительными напряжениями в растянутой арматуре $\sigma_{sp}=11200 \text{ кгс/см}^2$ [5, стр. 341].

4. Релаксация предварительно напряжённой проволоки

4.1. "... Модуль упругости полученных с завода канатов (витых, спиральных) имеет довольно большой разброс; для стабилизации модуля и снятия большей части деформаций ползучести канаты предварительно вытягивают на стенде усилием, равным 50...60% от разрывного. Полная относительная деформация ползучести составляет на 1 м для невытянутых канатов 1,5...2 мм, для вытянутых - не более 0,3...0,5 мм..." [1, стр. 105].

"... Явление ползучести в канатах из параллельных проволок практически отсутствует..." [1, стр. 108]. Там же (п. 8.7): "...Относительные деформации ползучести могут быть приняты: для спиральных канатов 0,00025, ...для канатов (пучков) из параллельных проволок - 0,0001...".

4.2. Вертикальные перемещения висячего или вантового моста от длительной ползучести канатов удобно определять исходя из предельных оценок относительных деформаций ползучести. При этом используют обычные программы расчёта стержневых систем на ЭВМ, заменяя фактор ползучести эквивалентным воздействием на систему от изменения температуры (нагревания). Расчётное, эквивалентное длительной ползучести, изменение температуры (в градусах Цельсия) для канатного элемента равно [1, п. 8.7]:

$$\Delta t_n = A/\alpha, \quad (1)$$

где A - предельная оценка относительной деформации ползучести каната;

α - коэффициент линейного температурного удлинения, $\alpha=0,000012$.

Таким образом, для спиральных канатов (при $A=0,00025$) эквивалентный длительной ползучести (релаксации) нагрев будет равен $\Delta t_n=20,8^\circ\text{C}$; для канатов из параллельных проволок (при $A=0,0001$) $\Delta t_n=8,3^\circ\text{C}$.

Поэтому для вантовых и висячих мостов длительная релаксация стальных канатов (мосты проектируются на срок службы 100 лет) оказывает значительно меньшее влияние, чем изменения внешней температуры (в условиях России температура конструкции в течение года изменяется на 100°C от -40°C зимой до $+60^\circ\text{C}$ летом на солнце). При этом в мостах из-за релаксации происходит увеличение длины несущего каната и, соответственно, появляется дополнительный провис пролётного строения без изменения напряжений в несущих проволоках каната.

4.3. При расчётах релаксации арматурной проволоки в предварительно напряжённых железобетонных конструкциях приняты другие методики расчёта. Например, в литературе приведен расчёт релаксации арматурной проволоки класса ВрП диаметром 5 мм, имеющей нормативное сопротивление на растяжении R_{sn} и расчётное сопротивление растяжению для предельных состояний второй группы $R_{s, ser}$

$$R_{sn} = R_{s, ser} = 13350 \text{ кгс/см}^2,$$

при этом в растянутой напрягаемой арматуре создают предварительные напряжения, равные $\sigma_{sp}=11200 \text{ кгс/см}^2$ [5, стр. 341]. Потери предварительного напряжения в арматуре от её релаксации $\sigma_{рел}$ определяются по формуле:

$$\sigma_{\text{рел}} = (0,27 \cdot \sigma_{\text{сп}} / R_{\text{s, ser}} - 0,1) \cdot \sigma_{\text{сп}} \quad (2)$$

Для приведённых данных железобетонной конструкции $\sigma_{\text{рел}} = 1410 \text{ кгс/см}^2$, что составит 12,6% от предварительного напряжения. Если пересчитать релаксацию в эквивалентную температуру нагрева, как это принято при расчёте висячих и вантовых мостов (см. выше), то $\Delta t_n = 58,8^\circ\text{C}$. Эти потери предварительного напряжения определяются как первые потери, только на период изготовления железобетонного изделия на заводе (наряду с потерями предварительного напряжения от температурного перепада по длине опалубки, от деформации анкеров, от трения арматуры, от деформации стальной формы, от ползучести бетона).

При расчёте вторых потерь предварительного напряжения, которые накапливаются в процессе эксплуатации железобетонных конструкций, потери от релаксации напряжённой арматуры принимаются в расчётах равными нулю [5, стр. 355]. На период эксплуатации, в том числе предварительно напряжённых железобетонных пролётных строений мостов и путепроводов, срок службы которых составляет 50...100 лет, расчёты на снижение предварительного напряжения арматуры ведут только по причине усадки бетона, ползучести бетона, смятия бетона в зоне контакта с арматурой, деформации обжатия стыков между блоками (для конструкций, состоящих из блоков).

5. Релаксация струны в СТЮ

5.1. Струна в рельсе-струне СТЮ набрана из прямых высокопрочных стальных проволок диаметром 2,5...7 мм, выпускаемых отечественной промышленностью (см. выше п.2).

Расчётные напряжения предварительного натяжения в струне, в зависимости от применяемой проволоки, составят 10000...15000 кгс/см², т.е. будут находиться в тех же пределах, что и в висячих и вантовых мостах и предварительно напряжённых железобетонных конструкциях (см. п.3).

Расстояние между соседними анкерными опорами в СТЮ составляет 1...2 км, такова же длина отдельных проволок в струне. На анкерных опорах проволоки струны жестко связаны со стальными анкерами, поэтому струна вместе с анкерами образует единую предварительно напряжённую стальную конструкцию, имеющую длину, равную длине трассы (например, для трассы "С.-Петербург - Москва" такая длина составит 660 км). Поэтому влияние смещения крайних анкеров и крайних анкерных опор на снижение предварительного напряжения в струне ничтожно мало и им можно пренебречь (смещение крайней анкерной опоры в упомянутой трассе даже на 1 м, например, в результате землетрясения, приведет к снижению предварительных напряжений растяжения в струне всего на 3 кгс/см²).

В СТЮ будут отсутствовать основные причины релаксации напряжений, которые характерны для предварительно напряжённых железобетонных конструкций (см. п. 4.3), а также - для висячих и вантовых мостов (релаксация подвесок, от смятия канатов на пилонах, от деформации пилонов и их фундаментов, от обжатия витых канатов и др.).

5.2. Релаксация струны, в соответствии с методикой, принятой при расчёте предварительно напряжённых железобетонных изделий, составит (для проволоки диаметром 5 мм класса ВрП при предварительном напряжении 10000 кгс/см²):

5.2.1. На стадии монтажа, когда будет осуществляться натяжение проволок струны на анкерные опоры и их предварительная вытяжка, релаксация составит (см. п. 4.3):

$$\sigma_{\text{рел}} = (0,27 \cdot 10000 / 13350 - 0,1) \cdot 10000 = 1022 \text{ кгс/см}^2$$

Последствия этой релаксации в СТЮ будут устранены тем, что величину предварительного натяжения проволоки берут выше, т. е. натягивают проволоку до напряжений 11540 кгс/см². После монтажных релаксаций напряжения в струне снизятся на 1540 кгс/см² и составят 10000 кгс/см². В относительном выражении данная релаксация (1540 кгс/см²) составила бы от первоначальной длины 0,00077, или 0,077%, или 1/1300.

По сути дела будет произведена вытяжка проволоки, т. е. тот процесс, который осуществляют при строительстве вантовых и висячих мостов, только в последнем случае это

делают предварительно, на заводском стенде (см. п. 4.1). Таким образом, в СТЮ, как и в предварительно напряжённых железобетонных изделиях, вытяжка проволоки будет совмещена с изготовлением изделия, что, соответственно, приведёт к снижению стоимости струны (исключается операция вытяжки проволоки на специально создаваемом стенде).

5.2.2. Вторые потери предварительного напряжения в струне в период эксплуатации СТЮ будет равны нулю (см. п. 4.3.), т.е. напряжения в струне будут определяться не процессами релаксации в её материале, а внешними факторами (величиной и характером действия подвижной нагрузки, изменениями температуры воздуха и др.).

5.3. Релаксация струны, в соответствии с методикой, принятой при расчёте висячих и вантовых мостов, составит (для той же проволоки, что приведена в п.5.2) величину, равную 0,0001 от первоначальной длины (см. п.4.1). Поскольку длина струны в СТЮ остаётся неизменной, то это приведет к уменьшению напряжений в ней на величину, равную 0,0001 от модуля упругости, т. е. на 200 кгс/см^2 . Таким образом, к концу срока службы СТЮ (через 100 лет) предварительные напряжения в струне снизятся с 10000 до 9800 кгс/см^2 .

6. Влияние релаксации на эксплуатационные характеристики СТЮ

Релаксация в материале струны приведет к снижению предварительного натяжения и, соответственно, к снижению её несущей способности. Это приведёт к увеличению статических провесов путевой структуры под действием собственного веса (150 кгс/м) и динамических прогибов - под действием подвижной нагрузки (5000 кгс).

6.1. Под действием собственного веса путевой структуры максимальная величина изменения параболического прогиба струны в центре пролёта, обусловленная релаксацией струны, будет равна [7]:

$$\Delta U_{\max, q} = ql^2/8T_p - ql^2/8T_0 \quad (3)$$

где q - вес единицы длины путевой структуры;

l - длина пролёта;

T_0 - начальное натяжение струны;

T_p - натяжение струны после релаксации.

При суммарной площади струны в путевой структуре, равной 100 см^2 , получим $T_0 = 1000 \text{ тс}$, $T_p = 980 \text{ тс}$ (при $\sigma_{\text{рел}} = 200 \text{ кгс/см}^2$). Тогда при $l = 50 \text{ м}$ и $q = 0,15 \text{ тс/м}$ получим $\Delta U_{\max, q} = 0,00096 \text{ м} \approx 1 \text{ мм}$. В относительном выражении это составит величину $1/50000$ от длины пролёта, что не отразится на ровности путевой структуры и на эксплуатационных характеристиках СТЮ.

6.2. Под действием подвижной нагрузки максимальная величина изменения прогиба путевой структуры в центре пролёта струны будет равна [7]:

$$\Delta U_{\max, p} = pl/4T_p - pl/4T_0, \quad (4)$$

где p - величина подвижной нагрузки.

При $p = 5 \text{ тс}$ и тех же параметрах СТЮ, что и в примере, приведенном в п. 6.1, $\Delta U_{\max, p} = 0,00128 \text{ м} \approx 1,3 \text{ мм}$. В относительном значении это составит $1/39000$ от длины пролёта, что практически не отразится на ровности путевой структуры и на эксплуатационных характеристиках СТЮ.

7. Выводы

Длительная релаксация в струне СТЮ, так же, как и в несущих канатах висячих и вантовых мостов и в напрягаемой арматуре предварительно напряжённых железобетонных конструкций, не окажет существенного влияния на эксплуатационные характеристики системы и при её проектировании может не учитываться. Учитывать необходимо лишь предварительную (монтажную) вытяжку высокопрочной стальной проволоки, что может быть осуществлено либо на вытяжном стенде завода-поставщика проволоки, либо - в процессе строительно-монтажных работ непосредственно при формировании струны в путевой структуре СТЮ.

Литература

1. Вантовые мосты. Под редакцией А. А. Петропавловского. М., "Транспорт", 1985.
2. В. К. Качурин и др. Проектирование висячих и вантовых мостов. М., "Транспорт", 1971.
3. Высокопрочная арматурная сталь. М., "Металлургия", 1986.
4. Г. М. Сахапова. Расчёты на релаксацию и ползучесть. Иркутск, 1970.
5. В. Ш. Каландадзе. Ресурсосберегающие железобетонные изделия. М., "Стройиздат", 1993.
6. Металлоизделия промышленного назначения. Справочник. Под редакцией Е. А. Явниловича. М., "Металлургия", 1966.
7. А. Э. Юницкий. Струнные транспортные системы: на Земле и в космосе. Гомель, "Инфо-Трибо", 1995.

А.Э. Юницкий

Генеральный конструктор СТЮ,
академик Российской Академии Естественных Наук