

ОЦЕНКА ИЗНОСА ВАНТОВЫХ КАНАТОВ



Безопасная эксплуатация подвесных мостов предполагает контроль технического состояния отдельных элементов сооружения: несущих вант, оттяжек, анкерных узлов, пилонов. Коррозия и накопление усталостных дефектов в несущих проволоках вантовых канатов являются наиболее типичными причинами снижения надежности мостового сооружения, поэтому их своевременное выявление крайне важно.

В практике существует два подхода, согласно которым оценивается износ вант. Первый из них требует разработки на стадии проектирования моста специализированной встроенной системы динамического мониторинга. Она непрерывно выдает диагностическую информацию, которая с помощью прикладного программного обеспечения (ПО) переводится в соответствующие технические параметры состояния инспектируемого элемента конструкции.

Однако некоторые вантовые системы не нуждаются в непрерывном мониторинге. Альтернативным способом является выборочный контроль, когда канаты, работающие в наиболее тяжелых условиях, проверяются периодически с привлечением внешних инструментальных средств. Данные, как и в первом случае, пересчитываются в обобщенный показатель, который позволяет судить об изменении тех-

нического состояния (несущей способности) конструкции ванты в процессе эксплуатации. Подходящим для этой цели параметром может служить количественная мера потери прочности каната вантовой системы вследствие постепенного накопления дефектов различной природы. В статье рассматривается именно этот метод, подразумевающий оценку остаточной прочности вантовых канатов по данным неразрушающего контроля с использованием расчетных моделей, принятых в механике материалов и конструкций.

Принципы и технология магнитной дефектоскопии вантовых канатов

Метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитного поля рассеяния, позволяет измерять относительную потерю металлического сечения по длине каната и обнаружи-

вать локальные дефекты, например обрыв проволок. Магнитный поток вдоль оси участка контролируемого каната создают постоянные магниты или возбуждающие индуктивные катушки с током, установленные в магнитной/электромагнитной головке дефектоскопа. Физические и механические нарушения целостности проволок каната — локальные дефекты (обрывы), сильно деформированные и истертые участки, коррозионные язвы — вызывают рассеяние магнитного потока, который регистрируется датчиками. Инспектируемый отрезок доводится до состояния магнитного насыщения, что позволяет четко выявлять обрывы как наружных, так и внутренних проволок и с высокой точностью измерять потерю сечения.

Дефектоскоп комплектуется электронным блоком, магнитной/электромагнитной головкой (ее тип определяется диаметром каната) и блоком съемных датчиков (датчики Холла и индуктивные катушки). Благодаря специальным головкам, снабженным колесной тягой, можно обследовать ванты диаметром до 300 мм.

Наряду с основным инструментом — дефектоскопом — для контроля вантовых канатов подвесных мостов требуется дополнительное оборудование. Магнитная головка с укрепленным на ней электронным блоком протягивается вдоль непод-

вижной ванты с помощью каната, который пропущен через кронблок, установленный у верхнего анкера контролируемой ванты. Тяговый канат перемещается с помощью электрической лебедки или вручную. Схематическое размещение оборудования при проведении магнитной дефектоскопии представлено на рис. 1.

Технология проведения работ по обследованию вантовых канатов опирается на «Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Основные положения» (М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2005) и СНиП 3.06.07-86 «Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний» (М.: Госстрой СССР, 1987). Калибровка измерительных каналов дефектоскопа (установка чувствительности) по потере сечения и локальным дефектам производится на имитаторах круглых канатов соответствующих диаметров, настройка дефектоскопа (установка нуля) по потере сечения и локальным дефектам — на бездефектном участке контролируемой ванты. Погрешность измерения потери металлического сечения дефектоскопом «ИНТРОС», укомплектованным магнитной головкой МГ 80–120, составляет $\pm 1\%$ от площади поперечного сечения ванты.

Методом магнитной дефектоскопии проинспектированы вантовые канаты закрытой и прядной конструкций на нескольких объектах: южнокорейском мосту Йонджон (рис. 2), Югорском мосту через реку Обь (Сургут), Октябрьском мосту через реку Шексна (Череповец), мосту «Факел» (Салехард), висячем переходе тепломагистрали через Ангару (Иркутск).

Цифровая информация с двух каналов дефектоскопа обрабатывается с помощью встроенного ПО. Результаты представляются в виде двух дефектограмм — потери сечения (ПС) и сигнала от локальных дефектов (ЛД) на контролируемом участке.

Типичные ПС- и ЛД-дефектограммы вантового каната закрытой конструкции приведены на рис. 3. Особенностью структуры каната является наличие трех слоев фасонных, имеющих Z-образное сечение проволок, которые навиты на шестислойный спиральный сердечник, состоящий из круглых проволок. Характерный подъем значений в начале и в конце ПС-дефектограммы вызван влиянием верхнего и нижнего анкеров контролируемой ванты. На отметке 47,5 м ЛД-дефектограммы

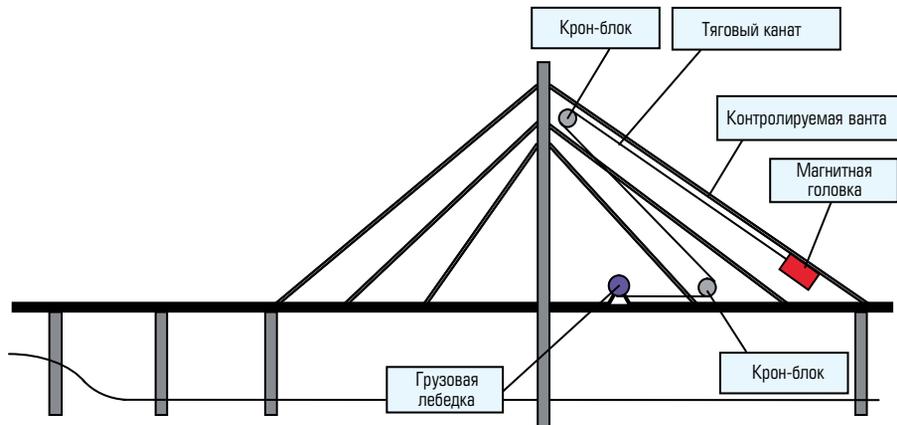


Рис. 1. Схема расположения оборудования при контроле вантовых канатов моста



Рис. 2. Контроль вантовых канатов моста Йонджон дефектоскопом «ИНТРОС»

отчетливо виден пик сигнала, соответствующий одиночному обрыву Z-проволоки внешнего слоя, что соответствует 1,6% потери общей площади сечения по металлу. Ниже приведен пример оценки изменения несущей способности данного каната с комментариями по поводу опасности подобного дефекта. Очевидно, этот участок каната требует повышенного внимания со стороны организации, контролирующей состояние моста.

Прочностные показатели технического состояния вантового каната

Стальные канаты, работающие на растяжение, подбираются по сертифицированному разрывному уси-

лию F из условия $F \geq \max S \cdot [n]$, где S — максимальное проектное рабочее натяжение каната; $[n]$ — заданный нормативный коэффициент запаса прочности по нагрузке. Разрывное усилие F (несущая способность, «агрегатная» прочность каната в целом) обычно определяется простейшим способом: суммарное расчетное разрывное усилие прямолинейных проволок-стержней умножается на коэффициент $k = 0,83-0,87$, приближенно учитывающий винтовую структуру каната.

Согласно подходу, принятому в механике сооружений, фактический запас прочности n каната с номинальным натяжением S рассчитывается по отношению к предельному механическому натяжению S_u , при котором

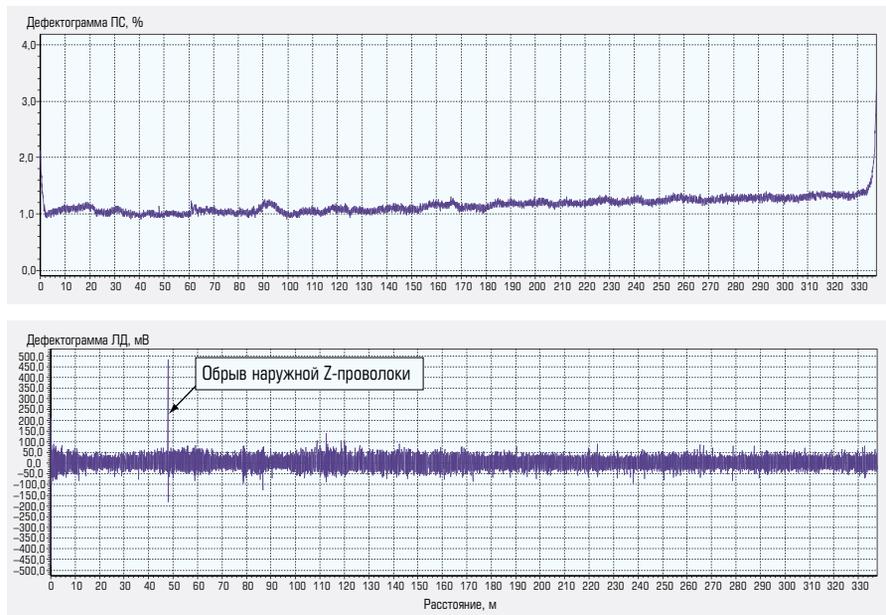


Рис. 3. Дефектограммы потери сечения и локальных дефектов вантового каната

исчерпывается несущая способность каната:

$$n = \frac{S_u}{S} \quad (1)$$

С точки зрения отказа конструкции предельное усилие S_u можно считать аналогом разрывной нагрузки F в нормативном критерии подбора нового каната.

В процессе эксплуатации моста несущая способность вант снижается вследствие накопления в проволоках различного рода повреждений. Реальный запас прочности рабочего каната с дефектами определяется отношением

$$\tilde{n} = \frac{\tilde{S}_u}{S} \quad (2)$$

Здесь, по аналогии с выражением (1), усилие \tilde{S}_u является критическим для изношенной в той или иной степени структуры каната.

С течением времени коэффициент запаса \tilde{n} может стать меньше нормативного значения $[n]$. По теории прочности, как только это событие произошло, канат немедленно должен быть заменен. Однако канат, будучи статически неопределимой системой, может служить до тех пор, пока его запас прочности \tilde{n} не уменьшится до минимально допустимого значения n_c . Параметр n_c имеет смысл запаса по «живучести» каната, если воспользоваться терминологией, принятой в теории надежности конструкций. Этот показатель отражает приемлемый риск при эксплуатации вантового каната с учетом износа отдельных его элементов.

Нарушение условия $\tilde{n} \geq n_c$ означает, что жизнеспособность каната исчерпана и его необходимо заменить.

Величина n_c назначается исходя из опыта эксплуатации аналогичных или сходных по конструкции вантовых систем или определяется пересчетом нормативных браковочных показателей дефектности по механической модели каната. Данный показатель играет первостепенную роль в оценке остаточного ресурса канатов и планировании сроков инспекций.

Моделирование разрушения и оценка несущей способности вант

Чтобы судить о запасе прочности вантового каната, нужно знать достоверное значение его предельного механического натяжения S_u . Статистическую оценку этого параметра можно получить, обработав данные испытаний канатов на разрыв. Однако для широкого ассортимента вант, в особенности большого диаметра, подобные исследования чрезвычайно затратны. Поэтому, как было указано выше, вместо экспериментальных значений разрывных нагрузок используются расчетные оценки — предполагается, что канат ведет себя как составной стержень при растяжении. Поправочный коэффициент k обычно вводится для прядных канатов, что основывается на опыте их эксплуатации. Но даже для подобных конструкций он лишь приблизительно

учитывает влияние винтовой структуры прядей и каната в целом на напряженное состояние в проволоках. Для закрытых канатов подобный коэффициент вообще не применяется. В отечественных и зарубежных сортаментах и каталогах за предельное натяжение принимают различные параметры, которые именуют «расчетное разрывное усилие», «минимальное разрывное усилие», «проектное разрывное усилие». Если канат имеет какие-либо дефекты несущего металлического сечения, то его предельное (критическое) натяжение \tilde{S}_u существующими методами не определяется. Поэтому в данной работе сделана попытка оценки предельных растягивающих усилий канатов типичных конструкций с помощью моделирования процесса разрушения при поэтапном увеличении натяжения.

В качестве характерных объектов взяты вантовый закрытый канат с тремя слоями Z-образных проволок $1 + 7 + 7/7 + 14 + 20 + 34Z + 41Z + 41Z$ диаметром 72 мм и вантовый прядный канат $37 + 9 \times 7 + 9 \times 36$ (WS) диаметром 84 мм. Аббревиатура WS означает конструкцию внешних прядей типа Warrington Seale.

Механические модели, описывающие деформацию обоих канатов, опираются на теорию Глушко–Малиновского. Аналитические соотношения моделей достаточно громоздки, поэтому лучше ограничиться общей характеристикой главных этапов расчета. Канаты рассматриваются как статически неопределимые системы с двумя обобщенными степенями свободы — линейной деформацией осевого растяжения ϵ и угловой деформацией кручения θ . Условия равновесия структурных элементов (прядей и проволок) и каната в целом подчиняются уравнениям теории тонких стержней Кирхгофа. Эффективные коэффициенты жесткости в уравнениях механического состояния канатов зависят от параметров жесткости проволок и геометрических характеристик винтовой структуры прядей и слоев проволок. Деформации ϵ , θ определяются из уравнений состояния каната для заданного натяжения S . Они преобразуются к системам координат, связанным с винтовыми осями проволок. Полученные деформации растяжения, изгиба и кручения каждой проволоки пересчитываются в соответствующие компоненты напряжений. Сложное напряженное состояние заменяется эквивалентным одноосным с помощью подходящего критерия прочности. Верификация моделей прово-

Расчетные предельные нагрузки вантовых канатов

Предельное натяжение	Прядный канат, диаметр 84 мм	Закрытый канат, диаметр 72 мм
Суммарная прочность проволок (стержневое приближение), кН	7007	5850
Агрегатная прочность в целом (стержневое приближение с поправкой на винтовую структуру), кН	6080	5100
Смоделированное значение по теории стальных канатов, кН	5590	4580

дилась на основе опытов по разрыву канатов с изначальными дефектами, тензометрирования проволок, а также родственных теорий расчета канатов.

На рис. 4 показаны диаграммы эквивалентных напряжений σ_{equiv} , построенные для закрытого и прядного канатов по сечениям слоев проволок. Ординаты столбиков соответствуют максимальным напряжениям в центральных проволоках сердечников.

Процесс разрушения структуры каната моделируется при пошаговом увеличении натяжения S . На каждом этапе определяется максимальное напряжение $\max \sigma_{equiv}$ в наиболее нагруженном слое проволок и проверяется условие прочности $\max \sigma_{equiv} \leq \sigma_u$, где σ_u — предел прочности материала проволок на разрыв (маркировочная группа по временному сопротивлению разрыву, согласно терминологии, принятой в сортаментах стальных канатов). При нарушении данного условия соответствующий слой (слои) проволок считается оборванным и удаляется из структуры. Процесс нагружения повторяется до тех пор, пока оставшиеся слои еще выдерживают нагрузку. Достигнутое значение усилия, при котором элементы каната продолжают разрушаться один за другим исключительно за счет высвобождения энергии деформации проволок, принимается за оценку предельного натяжения S_u .

Процессы разрушения прядного и закрытого канатов без начальных дефектов были смоделированы, и результаты представлены на рис. 5. Шаг увеличения натяжения равен 10 Н. Пределы прочности проволок прядного каната — 1770 МПа, закрытого каната — 1570 МПа (сердечник) и 1270 МПа (Z-слои). Маркеры и соответствующие цифры отмечают последовательные обрывы элементов канатов (слоев проволок), что выражается в скачкообразном накоплении потери несущего сечения по металлу. Переход от одного события к другому условно показан стрелками. Расчетная потеря сечения, при которой канат теряет рабочие качества, ограничена 30%. Пунктирными линиями отмечены паспортные агрегатные предельные усилия — 6080 кН для прядного и 5100 кН для закрытого канатов.

Разрушение закрытого каната происходит лавинообразно, что является следствием относительно однородного распределения напряжений в проволоках по сечению (рис. 4). При первом обрыве (центральной

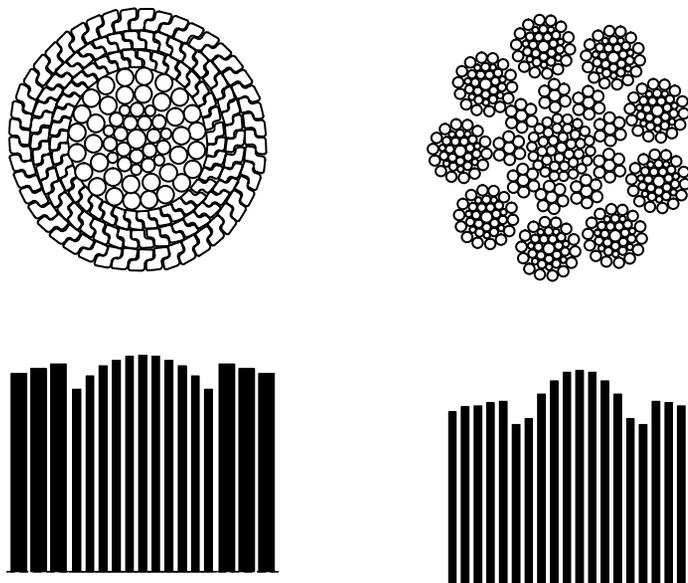


Рис. 4. Распределения относительных эквивалентных напряжений по сечениям закрытого (слева) и прядного (справа) вантовых канатов при осевом растяжении

проволоки сердечника) напряжения в оставшихся проволоках становятся больше предела прочности при сохраняющемся значении натяжения 4580 кН, которое и принимается в качестве предельного.

Прядный канат разрушается постепенно вследствие неравномерного исходного распределения напряжений по слоям проволок (рис. 4). В начале процесса при обрыве отдельных слоев оставшиеся проволоки еще способны воспринимать увеличение натяжения. По мере роста в них напряжений возникает ситуация, когда обрыв очередного слоя (точка 4) приводит к высвобождению энергии, достаточной для разрушения всех оставшихся структурных элементов при достигнутой неизменной нагрузке 5590 кН. Эта нагрузка и является расчетной оценкой предельного натяжения S_u .

В таблице приведена сводка расчетных предельных нагрузок рассмотренных типов вантовых канатов (сохранена

терминология, принятая в соответствующих сортаментах и каталогах).

Наименьшее теоретическое значение предельной нагрузки у обоих канатов получается в результате численного моделирования. Этот факт следует учитывать при оценке запасов прочности новых или действующих канатов по отношению к рабочему натяжению S .

Остаточная несущая способность каната с дефектами характеризуется коэффициентом запаса по нагрузке \bar{n} , который определяется выражением (2), где предельное натяжение S_u отличается от соответствующей паспортной характеристики, приводимой для бездефектных (целых) канатов. Параметр S_u можно оценить численным моделированием разрушения при заданном исходном распределении дефектов в структуре каната. В качестве примера применения данного алгоритма сделана оценка предельного усилия закрытого каната $7 + 7/7 + + 14 + 20 + 34Z + 41Z + 41Z$

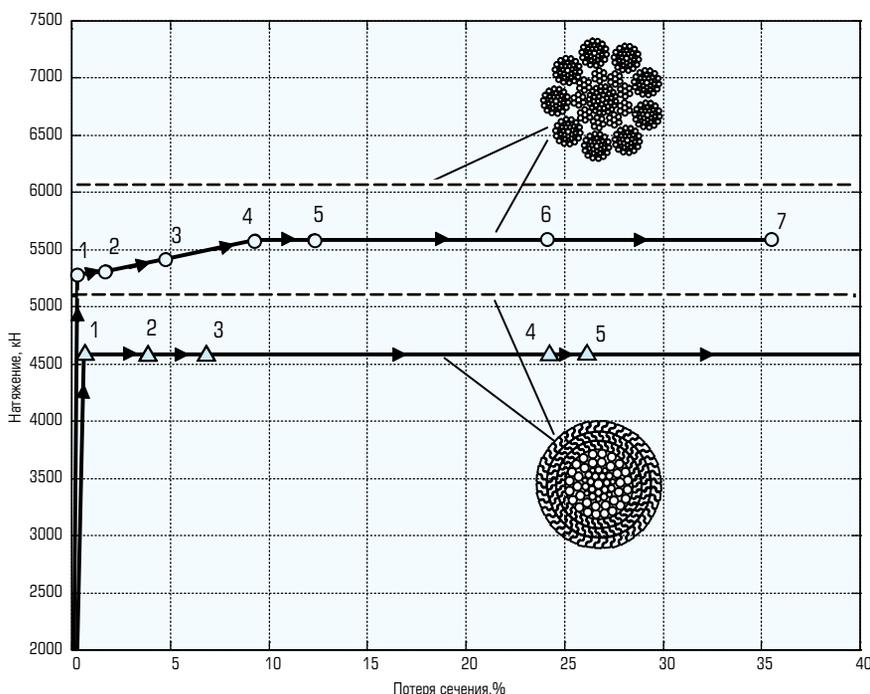


Рис. 5. Процессы разрушения прядного каната $37 + 9 \times 7 + 9 \times 36$ (WS) и закрытого каната $7 + 7/7 + 14 + 20 + 34Z + 41Z + 41Z$. Прядный канат: 1–4 — обрыв слоев проволок сердечника, начиная с центральной проволоки; 5–7 — обрыв слоев проволок внешних прядей, начиная с центральной проволоки. Закрытый канат: 1–3 — обрыв трех слоев проволок сердечника, начиная с центральной; 4 — обрыв первого (внутреннего) слоя Z-проволок; 5 — обрыв внешнего слоя сердечника и далее — обрыв второго слоя Z-проволок

диаметром 72 мм по данным магнитной дефектоскопии, представленным на рис. 4. В ослабленном сечении с одиночным обрывом Z-проволоки предельная осевая нагрузка составила $S_u = 4500$ кН. При том же номинальном натяжении S запас прочности каната уменьшился примерно на 2%. Это снижение формально допустимо. Однако опасность состоит в том, что

обрыв наружной Z-проволоки может спровоцировать нарушение замкового соединения слоя в целом и разматывание проволок. В результате наружный слой перестает воспринимать нагрузку, и открывается доступ влаги во внутренние слои каната (рис. 6).

Вантовые канаты проектируются в расчете на нормативный запас прочности по нагрузке $[n] = 1,8-2,2$, в зави-

симости от учитываемой комбинации внешних воздействий. Допускаемое рабочее натяжение каната S целесообразно назначать меньше предельного натяжения из таблицы. Для рассмотренного закрытого каната при $[n] = 2$ допускаемое натяжение, определяемое через верхнюю оценку предельного натяжения, подчиняется условию $S \leq 5850/2 = 2925$ Н; через нижнюю оценку — $S \leq 4580/2 = 2290$ Н. При выборе на стадии проектирования меньшей допустимой нагрузки обеспечивается некоторый резерв безопасности по отношению к негативному влиянию случайных и/или неучтенных эксплуатационных факторов, например динамических воздействий на вантовую систему.

Безусловно, данные об износе вант являются дополнительной информацией, полезной для организаций, отвечающих за содержание мостового сооружения. Результаты нескольких инспекций предоставляют возможность прогнозировать срок службы вантового каната по истории изменения его расчетной остаточной прочности. Смоделированное по теории стальных канатов значение предельного натяжения позволяет получить прочностные оценки состояния каната, которые идут в запас по надежности.

В.В. Сухоруков, д.т.н., профессор, президент компании;
А.Н. Воронцов, к.т.н., ведущий специалист отдела разработки;
А.В. Жирнов, ведущий специалист лаборатории неразрушающего контроля ООО «Интрон Плюс»



Рис. 6. Последствия нарушения замкового соединения Z-проволок наружного слоя закрытого каната