

ОПЕРАТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ИНСПЕКЦИИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

А.Н.Воронцов, В.Ю.Волоховский, В.В.Цуканов

ООО «Интрон Плюс», г.Москва

Введение

К надежности функционирования канатов грузоподъемных машин и механизмов предъявляются весьма жесткие требования. Поэтому планирование сроков инспекций их состояния и прогнозирование ожидаемой остаточной прочности является актуальной задачей [1].

Магнитный дефектоскоп ИНТРОС регистрирует два рода повреждений каната, влияющих на его рабочее состояние: распределенную по длине потерю сечения прядей вследствие утраты части проволок и локальные дефекты типа обрывов проволок. Оба дефекта приводят к снижению несущего сечения прядей по металлу и, соответственно, к уменьшению остаточной прочности каната.

Совместное влияние обоих дефектов на прочность может быть учтено с помощью механической модели поврежденного каната [2,3]. Модель позволяет оперативно планировать сроки очередных инспекций, принимая во внимание предысторию дефектоскопии каната, и оценивать его техническое состояние с точки зрения показателя несущей способности.

Оценка остаточной прочности поврежденного каната

Остаточная прочность дефектного каната может быть оценена с позиций двух критериев:

1) по допускаемым напряжениям проволок.

Коэффициент запаса каната по напряжениям n_σ определяется отношением $n_\sigma = \sigma_u / \sigma$ предельного напряжения материала проволок σ_u к максимальному напряжению σ в какой-либо проволоке, вычисленному согласно принятому критерию прочности. В этом случае относительная потеря прочности определяется параметром $\chi_\sigma = 1 - \tilde{n}_\sigma / n_\sigma$, где \tilde{n}_σ и n_σ - соответственно коэффициенты запаса поврежденного и бездефектного канатов в одних и тех же условиях;

2) по предельной нагрузке на одну прядь.

Этот критерий может быть применен для канатов, работающих при осевом нагружении. Напряженное состояние всех прядей считается одинаковым. Тогда предельное состояние каната ассоциируется с первым обрывом любой из его прядей. В свою очередь, предельное состояние пряди, судя по диаграммам деформирования каната, наступает при практически одновременном обрыве всех ее проволок. Коэффициент запаса пряди по нагрузке n_p определяется отношением величин предельной нагрузки и рабочей. Для бездефектного каната получим (1).

$$n_p = \frac{\sigma_u \sum_{k=1}^N A_k}{\sum_{k=1}^N \sigma_k A_k}, \quad (1)$$

где N - число проволок в целой пряди,

A_k - площадь сечения k -й проволоки пряди,

σ_k - максимальное эквивалентное напряжение в k -й проволоке.

Коэффициент запаса каната с дефектными прядями оценивается по формуле (2).

$$\tilde{n}_p = \min_s \left(\frac{\sigma_u \sum_{k=1}^{N_s} A_k}{\sum_{k=1}^{N_s} \sigma_k A_k} \right), \quad (2)$$

где N_s - число несущих проволок в пряди s .

Относительная потеря прочности определяется выражением $\chi_p = (1 - \tilde{n}_p / n_p)$. Для канатов, эксплуатируемых при осевой нагрузке, оценка $\chi = \max(\chi_\sigma, \chi_p)$ идет в запас прочности.

Входные параметры прочностного расчета - потеря сечения ΔA и число обрывов L - не учитывают распределение дефектов по проволокам прядей и носят, вообще говоря, случайный характер. Поэтому оценка снижения жесткости конструкции каната сопровождается статистическим моделированием размещения дефектов по прядям и группам проволок. Как следствие, параметр вычисляемой остаточной прочности имеет вероятностный смысл.

Из-за отсутствия данных о взаимном влиянии распределенных и локальных дефектов на прочность каната статистические оценки снижения прочности благодаря потере сечения $\chi_{\Delta A}$ и локальным обрывам χ_L определяются независимо друг от друга. Результирующая потеря прочности $\chi(x, t)$ в сечении контрольного участка с координатой x при наработке t оценивается суперпозицией $\chi(x, t) = \chi_{\Delta A}(x, t) + \chi_L(x, t)$. В качестве варианта прогнозирование работоспособности каната производится по альтернативному параметру - остаточной прочности $\eta(x, t) = 1 - \chi(x, t)$.

Алгоритм планирования сроков дефектоскопии

Относительная остаточная прочность $\eta(x, t)$ является невозрастающей функцией параметра t , то есть $\eta(x, t + \Delta t) \leq \eta(x, t)$ при $\Delta t > 0$. Условие надежного функционирования каната выражается требованием (3)

$$\min_x \eta(x, t) \geq \eta_*. \quad (3)$$

Допустимое значение остаточной прочности η_* ($0 \leq \eta_* \leq 1$) определяется эмпирически или на основе заданных норм дефектности. В начале эксплуатации $\eta(x, t_0) > \eta_*$. Нарушение условия (3) означает отказ каната.

В процессе эксплуатации при дискретных значениях наработки t_j ($j = 0, 1, 2, \dots$) на контролируемом участке каната записываются дефектограммы потери сечения и локальных обрывов, которые служат входными данными для вычисления распределения $\eta(x, t_j)$ и параметра прогноза $\eta_j = \min_x \eta(x, t_j)$.

Планирование дефектоскопии каната сводится к ответам на два вопроса:

1) прекращать или продолжать эксплуатацию каната при текущей наработке t_j на основе анализа совокупности значений η_j ($j \leq J$);

2) если продолжать, то для какого значения наработки $t_{j+1} = t_j + \Delta t_j$ необходимо проводить следующее диагностирование?

Планирование очередной инспекции при достигнутом значении наработки t_j основывается на экстраполяции аппроксимации дискретной функции $\eta(t_j)$ ($j \leq J$) зависимостью $f(t)$. Функция $f(t)$ строится методом наименьших квадратов по точкам $\eta(t_j), \eta(t_{j-1}), \dots, \eta(t_{j-(m-1)})$, полученных обработкой данных последних m инспекций. Интервалы между начальными инспекциями, после которых стартует алгоритм прогноза назначает оператор.

Простейшим вариантом является линейная аппроксимация $f(t, a_1, a_2) = a_1 + a_2 t$ по трем точкам $\eta_{j-2} = \eta(t_{j-2}), \eta_{j-1} = \eta(t_{j-1}), \eta_j = \eta(t_j)$. Параметры a_1, a_2 вычисляются по критерию наименьших квадратов (4).

$$\sum_{i=1}^3 \rho_i [f(t_{j-3+i}, a_1, a_2) - \eta_{j-3+i}]^2 \rightarrow \min_{a_1, a_2} \quad (4)$$

Здесь $\rho_i = 1/\varepsilon_i > 0$ - весовые коэффициенты, учитывающие возможную разницу погрешностей ε_i , с которыми получены точки η_{j-3+i} .

Шаг прогноза Δt_j , определяющий момент следующей инспекции $t_{j+1} = t_j + \Delta t_j$ ожидаемую величину остаточной прочности $\eta(t_{j+1})$, зависит от соотношения между предыдущим шагом $\Delta t_{j-1} = t_j - t_{j-1}$ и интервалом $\Delta t_* = t_* - t_j$ достижения функцией $f(t)$ допустимого уровня η_* . Если $\Delta t_* > \Delta t_{j-1}$ то, полагают, $\Delta t_j = \Delta t_{j-1}$ и прогнозируемую остаточную прочность оценивают экстраполяцией $\eta(t_{j+1}) \approx f(t_j + \Delta t_j)$.

Накопление обрывов проволок вызывает лавинообразное разрушение каната, вследствие чего к уровню η_* прогноз должен приближаться с особой осторожностью. При $\Delta t_* < \Delta t_{j-1}$ шаг Δt_j назначается с учетом ожидаемой скорости деградации каната $s = (\eta_* - \eta_j) / \Delta t_*$. Если $|s| > |a_2|$ ($\eta_j > f(t_j)$), то $\Delta t_j = \alpha (\eta_* - f(t_j)) / s$, где множитель $0.5 \leq \alpha \leq 1$ регулирует риск прогноза вблизи допустимого значения прочности η_* . В случае $|s| < |a_2|$ ($\eta_j < f(t_j)$)

назначается половинный шаг $\Delta t_j = 0.5\Delta t_*$ и строится дополнительная аппроксимация $\tilde{f}(t) = \tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 t$ с промежуточным наклоном $|s| \leq |\tilde{a}_2| \leq |a_2|$. Ожидаемая прочность оценивается величиной $\eta(t_{j+1}) \approx \tilde{f}(t_j + \Delta t_j)$.

Теоретически планируемый срок инспекции следует понимать лишь как рекомендацию; окончательное решение о состоянии каната и предполагаемых действиях принимает оператор.

Примеры

Расчет остаточной прочности по критерию максимальных напряжений и прогноз сроков инспекций были сделаны для канатов PYTHON 8xK19S + PWRC(K) диаметрами 8 мм и 11 мм, которые подвергались испытаниям на усталостное разрушение при растяжении. Накопление дефектов периодически контролировалось магнитным дефектоскопом ИНТРОС на участке длиной $X = 10$ м. В качестве наработки t принималось число циклов нагружения. Допустимый уровень остаточной прочности η_* задавался на основании данных о предельном состоянии канатов перед обрывом. Параметры потери прочности $\chi_{\Delta A}(x, t_j)$ и $\chi_L(x, t_j)$ вычислялись осреднением по 200-м реализациям с надежностью оценки 0.997 по данным дефектоскопии потери сечения ΔA и локальных обрывов L в сечении $0 \leq x \leq X$ при очередной наработке t_j .

Для каната диаметром 8 мм распределения параметра остаточной прочности (в процентах) $\eta(x, t_j)$ вдоль инспектируемого участка показаны на рисунке 1.

Планирование сроков дефектоскопии и прогноз работоспособности каната производится по минимальным значениям прочности $\eta_j = \min_x \eta(x, t_j)$ (отмечены кружками), которые являются следствием постепенного накопления обрывов. На рисунке 2 показано изменение минимальной прочности η_j в ходе испытаний и траектории прогнозируемых приближений $f(t_j)$. Лежащая выше интегральная оценка прочности инспектируемого участка $X^{-1} \int_x \eta(x, t_j) dx$ характеризует, главным образом, накопление распределенных дефектов типа потери сечения.

Аналогичные результаты, полученные по данным дефектоскопии каната диаметром 11 мм, приведены на рисунке 3.

Оба примера носят методический характер, так как прогнозируемые значения «наложены» на полностью сформированные заранее зависимости диагностического признака η_j . В реальной практике планируемая наработка каната к моменту следующей инспекции и ожидаемая прочность определяются немедленно вслед за текущей инспекцией с учетом ближайшей предыстории диагностики.

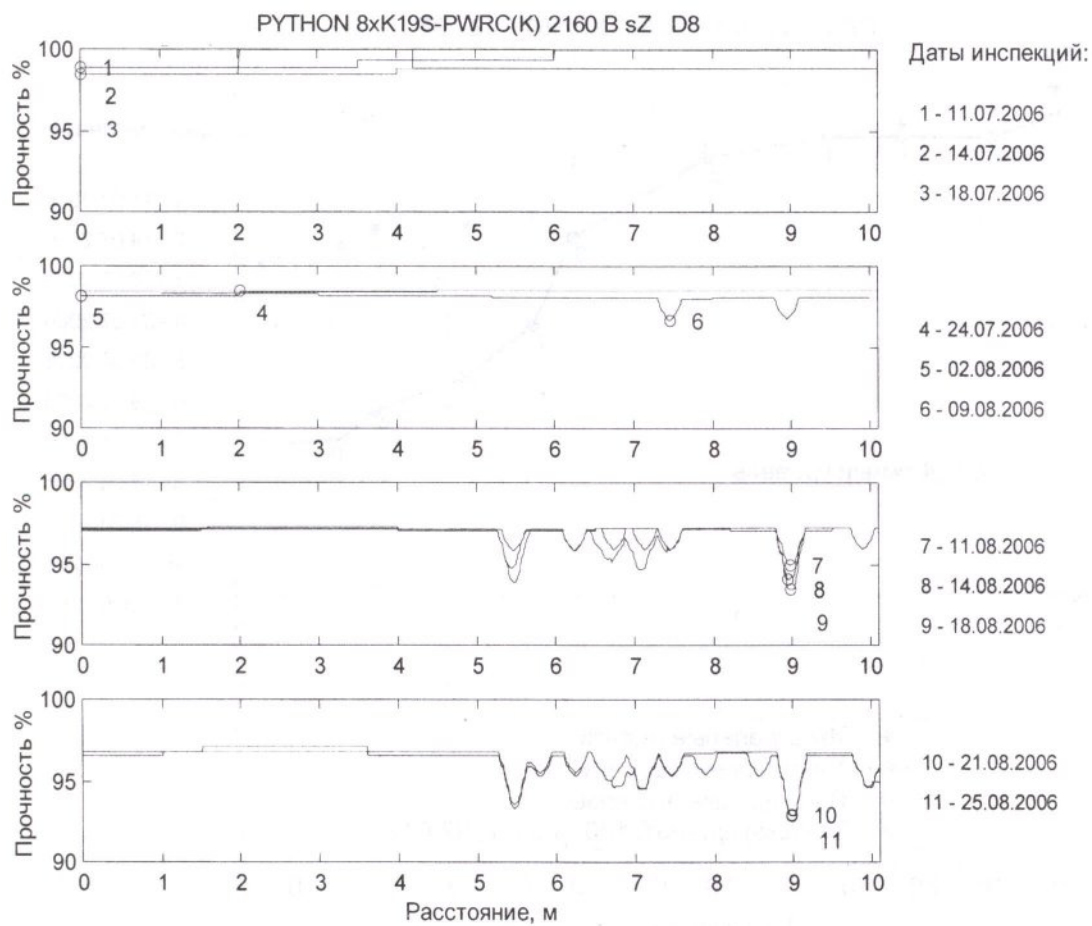


Рисунок 1 - Распределение диагностического показателя – относительной остаточной прочности – вдоль участка каната при последовательных инспекциях

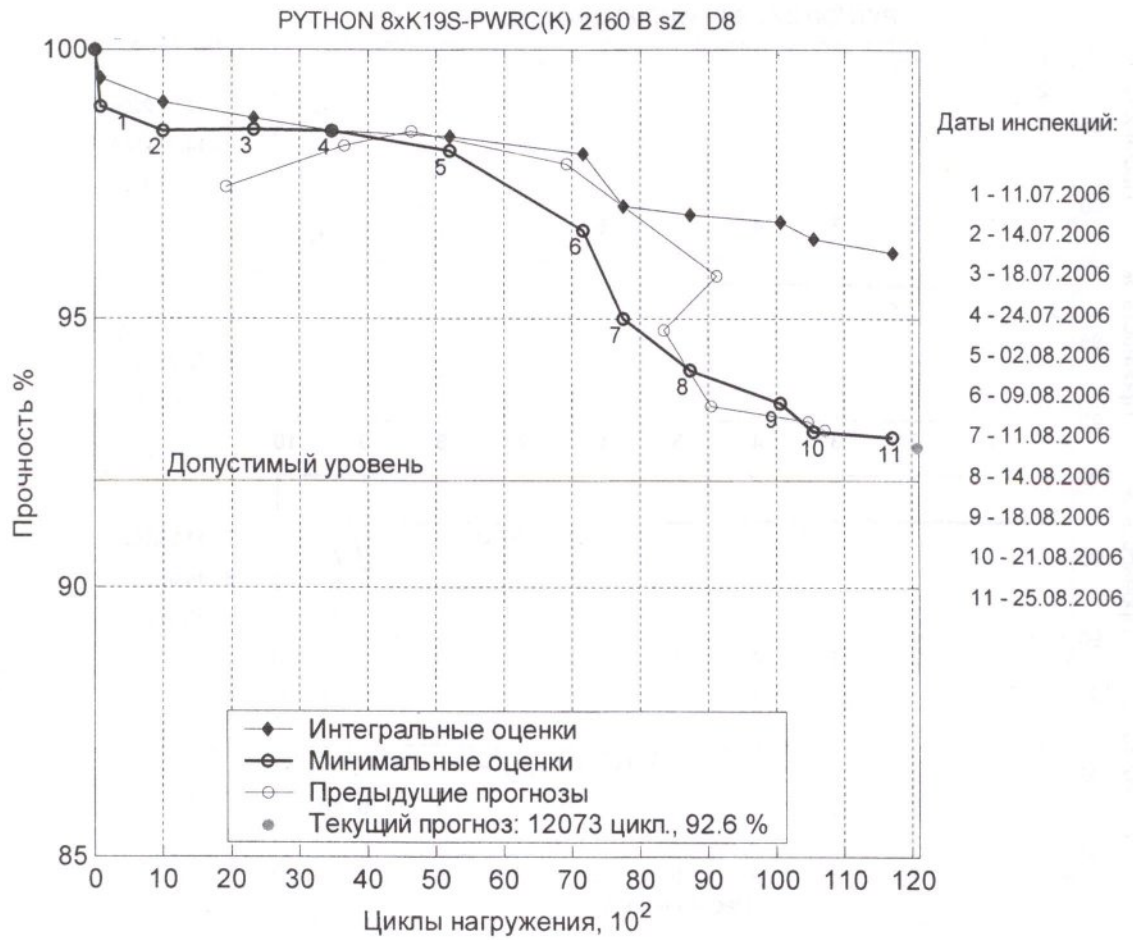


Рисунок 2 - Изменение прочности и планируемые инспекции в ходе эксплуатации каната D8

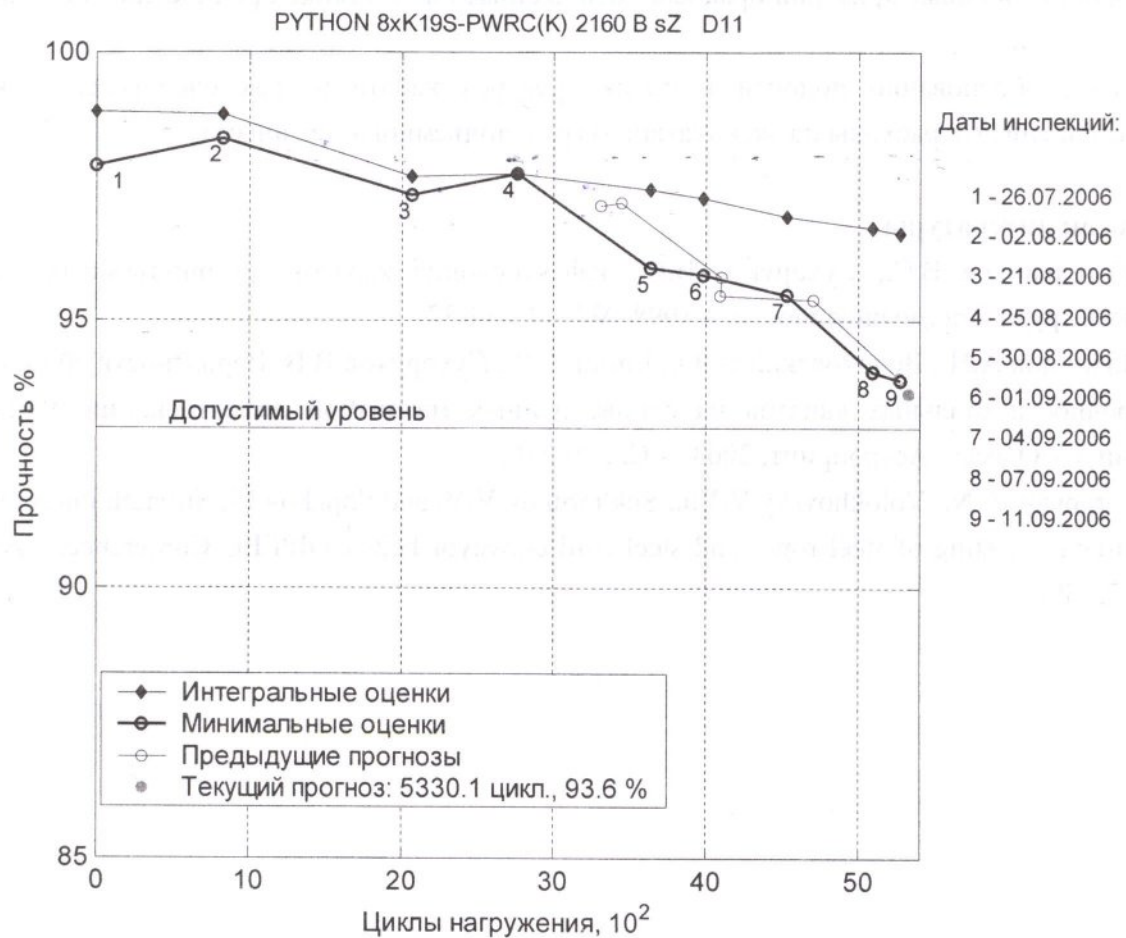


Рисунок 3 - Изменение прочности и планируемые инспекции в ходе эксплуатации каната D11

Таким образом, методика оценки прочности поврежденного каната по данным дефектоскопии учитывает:

- конструкцию каната и сложное напряженное состояние проволок;
- совместное влияние распределенных и локальных дефектов на потерю прочности;
- снижение прочности благодаря накоплению данных магнитной дефектоскопии об оборванных проволоках;
- данные приборного и/или визуального контроля;
- влияние сил трения на восстановление несущей способности оборванных проволок;
- влияние поперечной податливости прядей на прочность каната;
- изменение шагов свивки проволок и прядей в процессе эксплуатации.

Методика позволяет:

- проследить за изменением прочности на контролируемом участке каната от инспекции к инспекции;
- выявить зоны опасного накопления дефектов, где возможно разрушение;
- дать рекомендации относительно величины наработки каната к моменту следующей инспекции и оценить ожидаемый уровень остаточной несущей способности (прочности);
- проанализировать согласованность имеющихся нормативных критериев браковки канатов;

- выработать новые критерии браковки, основанные на динамике прочностных показателей каната;

- более обоснованно подойти к оценке ресурса каната и, как следствие, повысить безопасность и снизить расходы на эксплуатацию грузоподъемного механизма.

Список литературы

1 Котельников В.С., Сухоруков В.В. Дефектоскопия канатов грузоподъемных машин. Безопасность труда в промышленности. – 1998. №5. - С. 34-37.

2 Воронцов А.Н., Волоховский В.Ю., Каган А.Я., Сухоруков В.В. Вероятностный подход к оценке прочности стальных канатов на основе данных магнитной дефектоскопии. Стальные канаты, вып.3. - Одесса: Астропринт, 2003 . - С. 200-210.

3 Vorontsov A.N., Volokhovskiy V.Yu., Sukhorukov V.V. and Shpakov I.I. Strength interpretation of non-destructive testing of steel ropes and steel-cord conveyor belts// OIPEEC Conference. - Athens, 2006. – С. 73-80.