

УДК 622.647.2:620.179.1

**А.Н. Воронцов, В.Ю. Волоховский, Д.А. Слесарев**

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

*Изложена методика оценки остаточной прочности и индивидуального ресурса стальных канатов с использованием данных магнитной дефектоскопии. Прогноз ресурса производится по коэффициенту запаса прочности, который определяется расчетом каната с измеренными дефектами методами механики конструкций. Приведены примеры расчета несущей способности и ресурса шахтного и кранового канатов.*

*Ключевые слова:* стальной канат, магнитная дефектоскопия, потеря сечения, обрыв проволоки, коэффициент запаса, остаточная прочность, ресурс.

---

**В** процессе эксплуатации стальных канатов грузоподъемных машин и механизмов неизбежно встает вопрос о безопасном сроке службы, который на практике обычно именуют остаточным ресурсом. Прогнозирование текущего индивидуального ресурса каната в конкретных условиях требует оперативного периодического контроля его состояния как механической конструкции и оценки несущей способности по имеющейся диагностической информации.

Относительно надежным инструментом получения подобной информации служит магнитная дефектоскопия, регистрирующая два типа дефектов, влияющих на прочность каната: потерю сечения по металлу вследствие истирания, коррозии и других причин и локальные повреждения в виде обрывов проволок [1]. Эти два диагностических показателя можно использовать в качестве входных параметров структурной механической модели каната. Механический расчет каната с подобного рода дефектами позволяет:

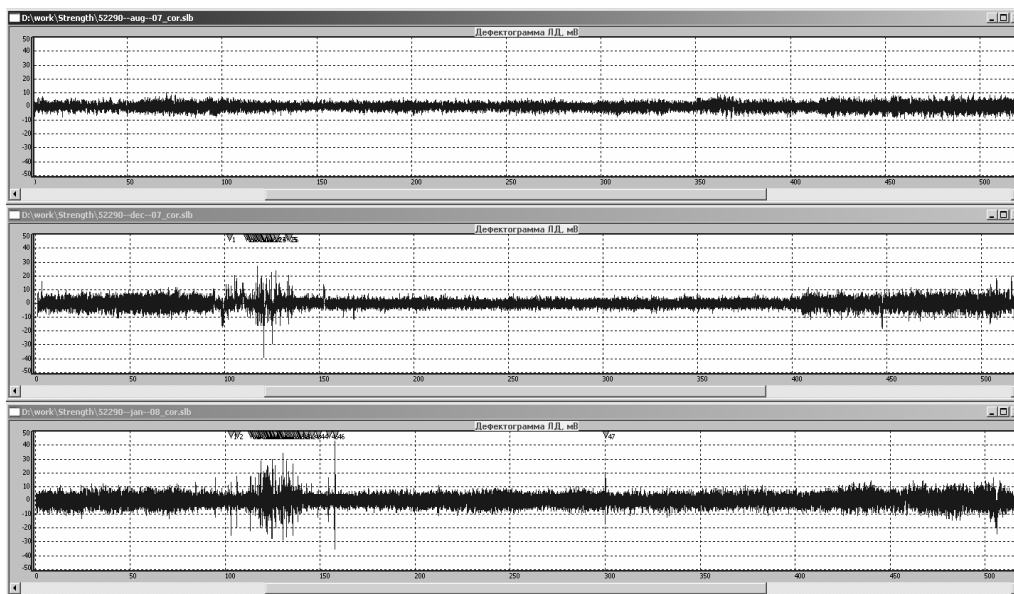
— проследить за изменением прочности каната в процессе эксплуатации,

— выявить зоны опасного накопления дефектов с вероятными очагами разрушения,

— планировать сроки инспекций и оценивать остаточный ресурс каната на основании анализа средней скорости накопления повреждений,

— определить обобщенный браковочный показатель в виде предельного минимального коэффициента запаса прочности (живучести) каната с дефектами.

Расчет стального каната опирается на теорию Глушко-Малиновского, которая, рассматривая канат как гетерогенную структуру, позволяет определить напряженное состояние каждой проволоки при разнообразных условиях нагружения [2,3]. Методика оценки прочности по данным неразрушающего контроля разработана для неподвижных и несущих канатов различного типа, работающих при растяжении, а также подвижных канатов, огибающих блоки, шкивы и барабаны



**Рис. 1. Дефектограммы локальных дефектов (ЛД) шахтного каната ТУ 14-4-1552-89**

при сочетании растяжения и циклического изгиба [4,5]. При этом учитываются такие факторы, как совместное влияние распределенных и локальных дефектов на потерю прочности, накопление данных приборного и/или визуального контроля, влияние сил трения на восстановление несущей способности оборванных проволок на удалении от места обрыва и собственный вес длинных канатов.

В данной работе остановимся на некоторых результатах оценки остаточной прочности и ресурса, которые получены по диагностическим показателям – потере сечения (ПС) и локальным дефектам (ЛД) – для каната шахтного подъема и кранового каната. Из-за отсутствия надлежащей статистической информации ресурс оценивается в детерминистическом смысле.

Восьмипрядный шахтный канат диаметром 63 мм (ТУ 14-4-1552-89) прошел пять инспекций с декабря

2006 г. по январь 2008 г. на предприятии Уралкалий. Результаты измерений, полученные дефектоскопом Интрос на третьем, четвертом и пятом обследованиях, показаны на рис. 1 и рис. 2 (первые две инспекции не выявили каких-либо заметных дефектов). На дефектограммах локальных дефектов (рис. 1) желтым маркером отмечены обрывы проволок. Число оборванных проволок, соответствующих конкретному локальному дефекту, определяется с учетом амплитуды и формы сигнала от обрыва на дефектограмме ЛД, локальной величины потери сечения и конструкции каната.

Периодическая диагностика, наряду с ростом числа локальных дефектов, выявила и развивающуюся потерю сечения. На рис. 2 показаны соответствующие дефектограммы потери сечения (ПС), наложенные друг на друга. Максимальный уровень потери сечения при третьем обследовании на

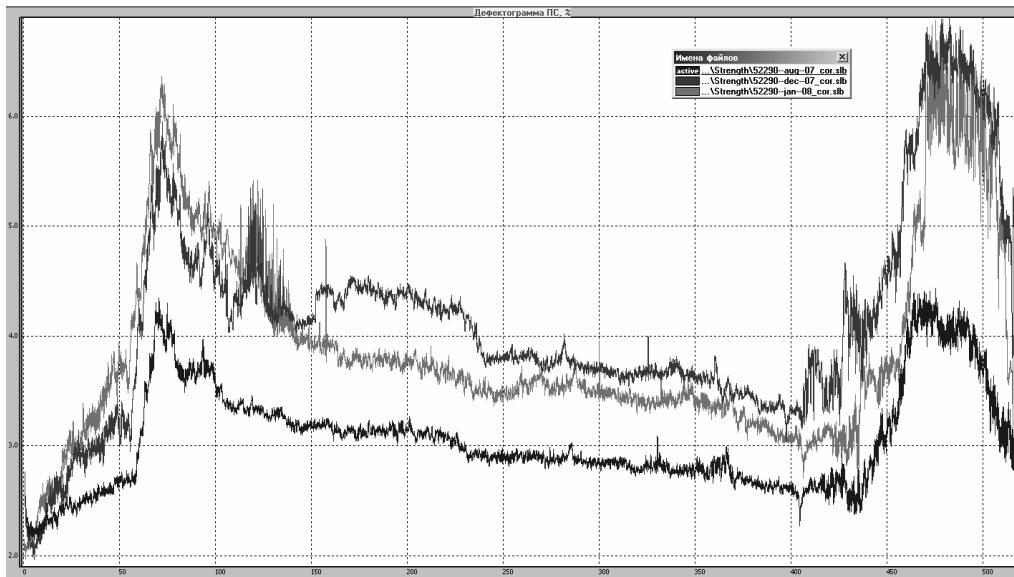


Рис. 2. Дефектограммы потери сечения (ПС) шахтного каната ТУ 14-4-1552-89

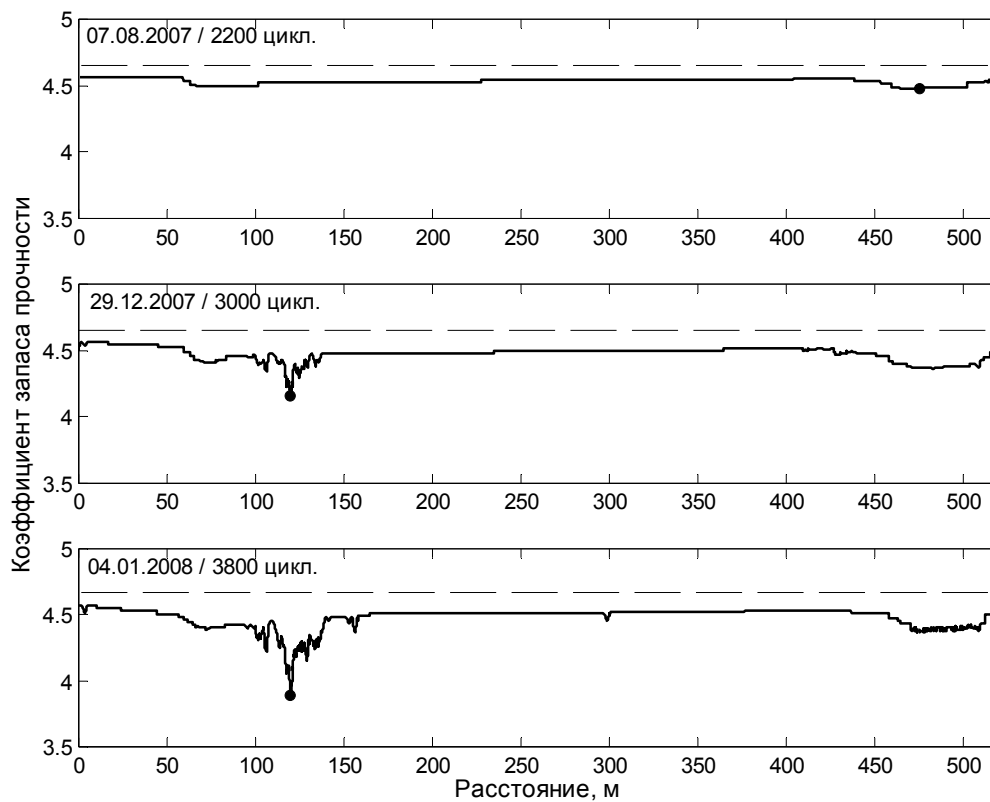
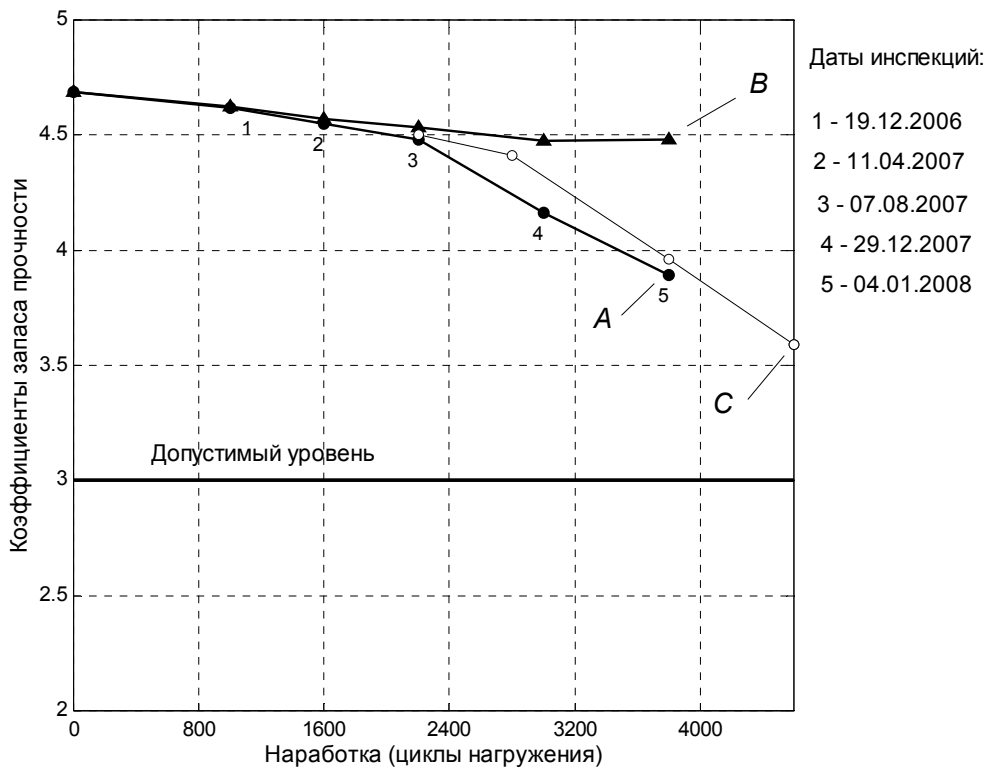


Рис. 3. Изменение коэффициента запаса прочности шахтного каната ТУ 14-4-1552-89 на участке контроля



**Рис. 4. Изменение коэффициентов запаса шахтного каната ТУ 14-4-1552-89 в процессе эксплуатации:** А – минимальные оценки; В – обобщенные оценки; С – ожидаемые запасы прочности к очередным инспекциям

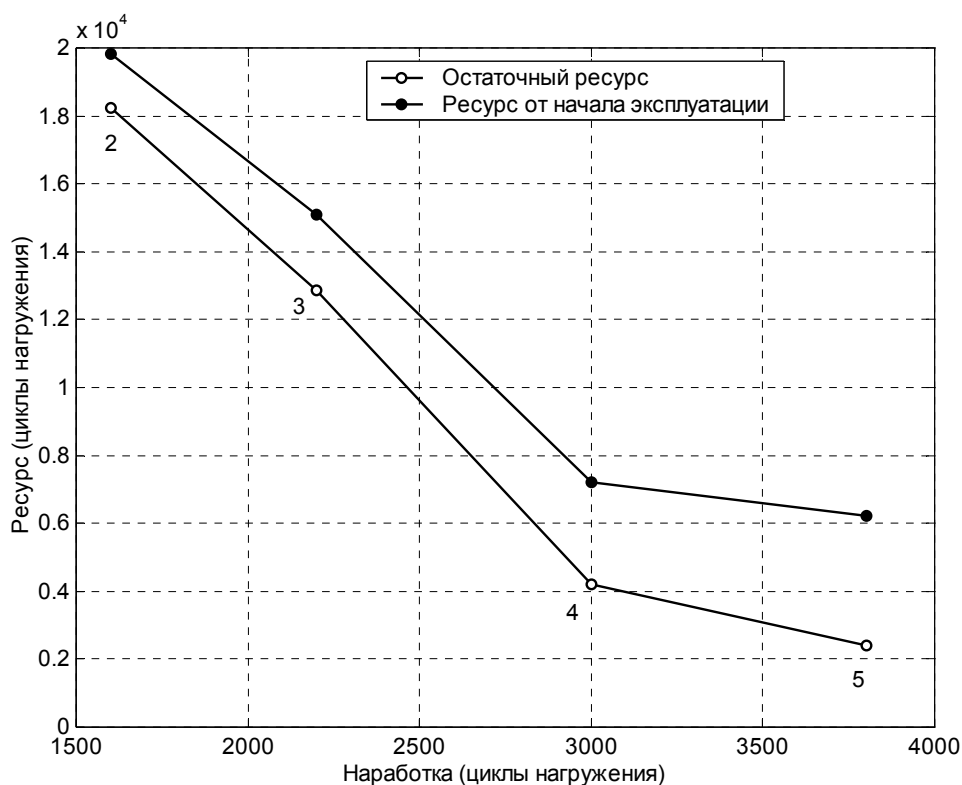
2 % выше, чем при первом. Очевидно, подобные дефектограммы отражают постепенную деградацию прочности каната.

Для количественной оценки потери несущей способности и остаточного ресурса обследованного каната используется программный модуль *RopeStrength*, в который экспортируются результаты обработки дефектограмм — данные о локальных дефектах и распределении потери сечения.

На рис. 3 приведены расчетные распределения запаса прочности по напряжениям на прямом контролируемом участке для рассмотренных выше инспекций при наработках каната в 2200, 3000 и 3800 циклов

(единица цикла соответствует одной фазе «нагрузка-разгрузка»). Коэффициент запаса определяется по отношению к пределу прочности материала проволок на разрыв  $1860 \text{ Н/мм}^2$  при номинальном натяжении каната  $600000 \text{ Н}$ . Пунктирная линия отмечает запас прочности по напряжениям нового каната, равный 4,68.

Резкие падения запаса прочности соответствуют зонам скопления обрывов проволок, которые различимы на дефектограммах ЛД (рис. 1). Очевидно, эти зоны являются вероятными очагами разрушения каната, требующими особого внимания. На участках  $(50 \div 100) \text{ м}$  и  $(400 \div 500) \text{ м}$  сниже-



**Рис. 5. Изменение показателей ресурса шахтного каната ТУ 14-4-1552-89 в процессе эксплуатации (цифры – инспекции, по данным которых сделаны прогнозы)**

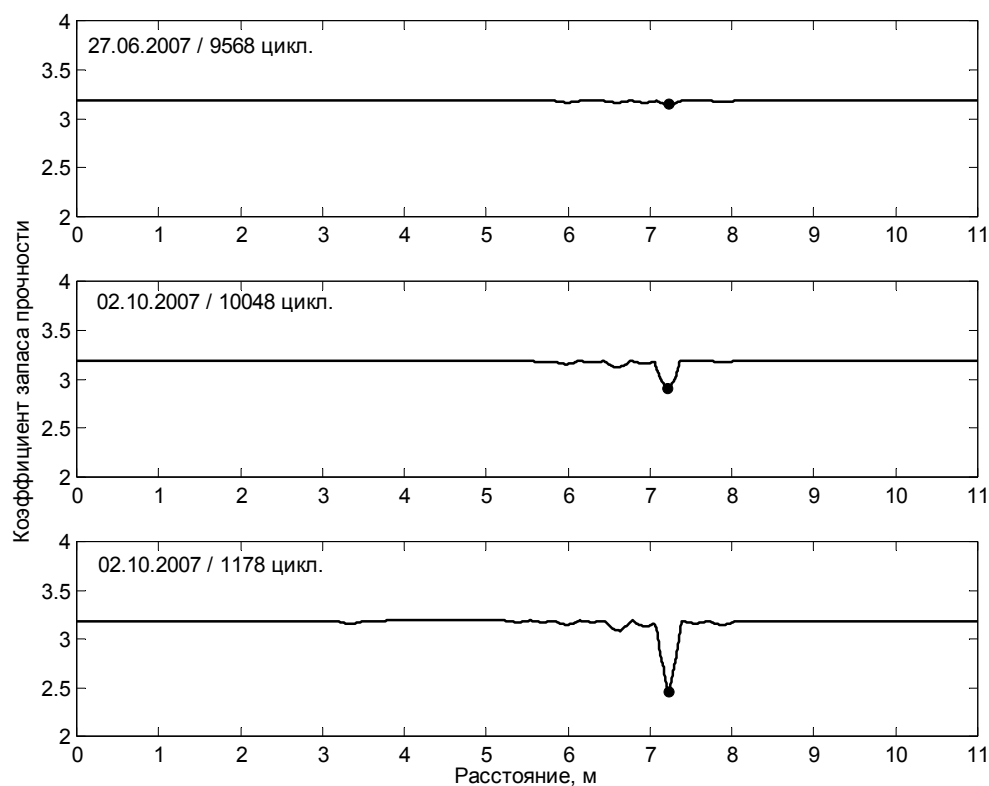
ние прочности обусловлено в основном потерей сечения (рис. 2).

Рис. 4 демонстрирует изменение прочностных показателей каната в зависимости от наработки, измеряемой в циклах нагружения (для всех пяти инспекций, начиная с условно нового каната). Здесь и далее расчетные значения для наглядности соединены прямыми линиями.

Минимальные оценки (А) соответствуют значениям, которые отмечены кружками на рис. 4, обобщенные оценки (В) – осредненным запасам прочности на участке контроля. Рекомендуемые сроки инспекций (С) и остаточный ресурс оценивались всякий раз по предшествующей ближай-

шей прочностной истории каната, которую символизирует зависимость (А) [5]. После пятой инспекции следующий контроль каната планируется провести по истечении 4600 циклов наработки, при этом коэффициент запаса ожидается равным 3,61.

Ресурс каната, изменяющийся по мере накопления дефектов и снижения несущей способности, показан на рис. 5. Прогнозируемые значения рассчитаны относительно минимально допустимого коэффициента запаса 3,0, который приблизительно соответствует принятым нормам браковки канатов шахтных стволов [6]. Ресурс от начала эксплуатации является суперпозицией наработки и остаточно-



**Рис. 6** Изменение коэффициента запаса прочности канатного каната РYTHON 8xK19S + PWRC(K) на участке контроля

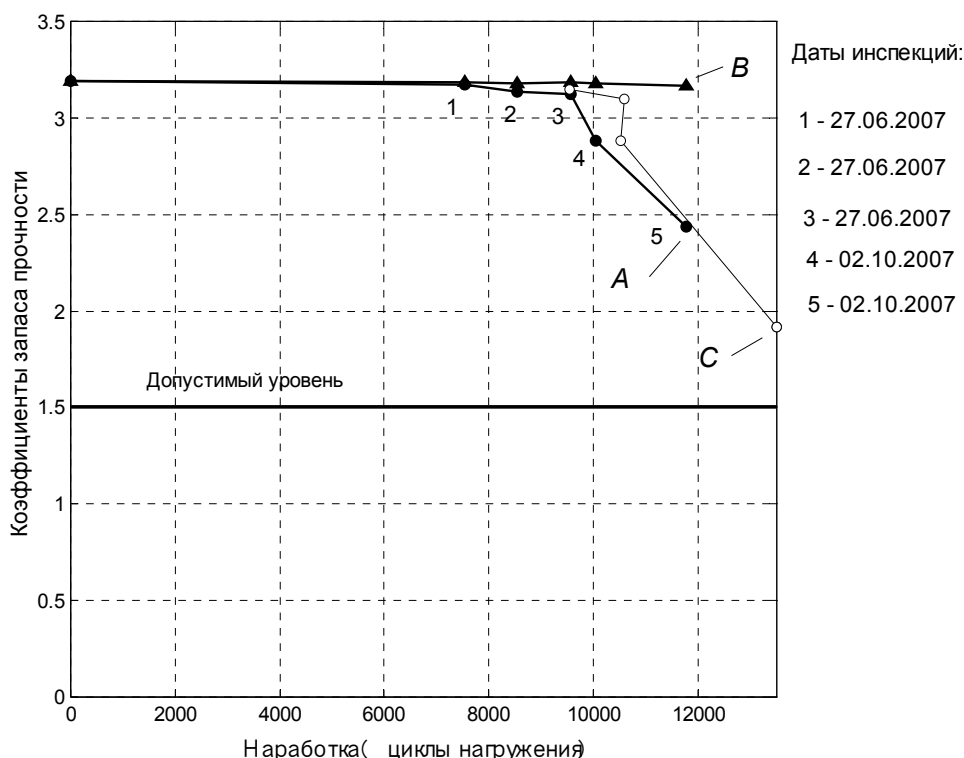
го ресурса. По данным последней (пятой) инспекции остаточный ресурс оценивается в 2498 циклов, а общий ресурс – 6298 циклов.

Второй пример относится к канатному канату, работающему на блоке в условиях растяжения и изгиба. Канат конструкции РYTHON 8xK19S(1+9+9) +PWRC(K)(4x19+4x7+1x7) проходил обследования дефектоскопом Интрос в компании Konecranes (Финляндия). Контроль состояния каната производился несколько раз в течение суток. Диаметр каната 8 мм, диаметр блока 350 мм, номинальное натяжение 10 кН, предел прочности проволок на разрыв (маркировочная группа) 2160 Н/мм<sup>2</sup>. Запас прочности определялся расчетом на выносливость с учетом

характеристик цикла напряжений при изгибе каната на блоке и влияния концентраторов напряжений на сопротивление усталости.

Результаты, иллюстрирующие изменение показателей несущей способности и ресурса каната по мере накопления дефектов, представлены на рис. 6 – 8. Коэффициент запаса прочности нового каната равен 3,20, предельно допустимый – 1,5. Планируемая наработка каната к следующей инспекции составляет 13508 циклов, а остаточный запас прочности ожидается к этому моменту на уровне 1,91 (рис. 7).

Остаточный ресурс после пятой инспекции, при довольно интенсивной деградации каната (что видно по



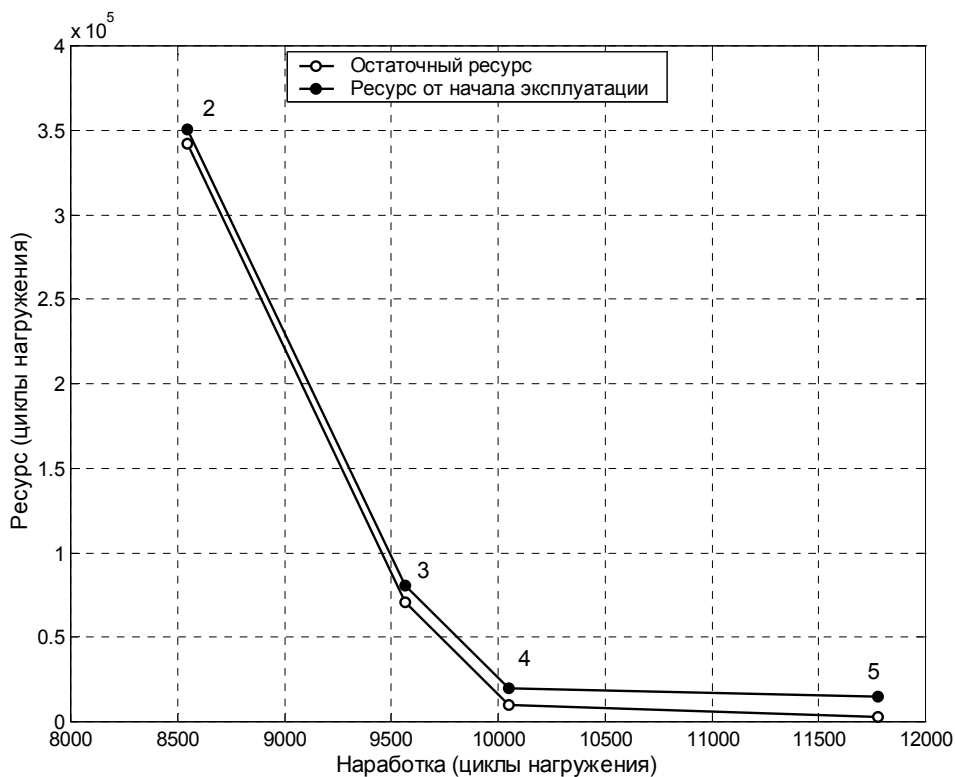
**Рис. 7. Изменение коэффициентов запаса канатного каната PYTHON 8xK19S + PWRC(K) в процессе наработки:** А – минимальные оценки; В – обобщенные оценки; С – ожидаемые запасы прочности к очередным инспекциям

заметному падению прочности на рис. 7), оценен в 2850 циклов (рис. 8). Канат не был доведен до разрушения, поэтому его реальный ресурс остался неизвестным.

Прокомментируем некоторые особенности прочностного расчета стальных канатов. Коэффициенты запаса прочности новых канатов при растяжении без кручения, рассчитанные для наиболее напряженной проволоки, оказываются на (10÷20)% меньше коэффициентов запаса, которые обычно назначаются при выборе нового каната исходя из величины сертифицированного разрывного усилия [6]. Реальный запас прочности каната, выбранного по разрывному

усилию, оказывается на самом деле значительно меньше назначенного (в 1,5 ÷ 5 раз), если натянутый канат испытывает дополнительно кручение и/или изгиб, тем более, когда нагрузки изменяются циклически. Особенно это характерно для канатов сложной конструкции [3]. Расчет по напряжениям учитывает особенности и структуры и типа нагружения, поэтому, в конечном итоге, он более объективно отражает состояние каната и дает оценки, идущие в запас прочности.

В процессе эксплуатации несущая способность каната уменьшается за счет накопления дефектов, и коэффициент запаса прочности становится меньше нормативного значе-



**Рис. 8. Изменение показателей ресурса канатного каната PYTHON 8xK19S + PWRC(K) в процессе эксплуатации (цифры – инспекции, по данным которых сделаны прогнозы)**

ния, принятого для нового каната. С точки зрения теории прочности, как только это событие произошло (скорее всего, оно будет выявлено после первых же инспекций), канат должен быть немедленно снят с эксплуатации. Однако канат, будучи статически неопределимой системой, способен и дальше выполнять свои функции. Это обстоятельство отражено в исторически сложившихся эмпирических критериях браковки канатов по предельному числу и виду дефектов [7, 8, 9].

Алгоритмы планирования сроков инспекций и прогноза остаточного ресурса ориентируются на минимально допустимый коэффициент запаса

по «живучести» каната  $n_*$  (в наших примерах – 3,0 и 1,5), если воспользоваться терминологией, принятой в авиастроении. Под запасом живучести понимают способность системы выполнять хотя бы частично свои функции при разрушении отдельных элементов [10]. Надежное функционирование каната означает, что минимальный на участке контроля показатель прочности при текущей наработке остается больше допустимого уровня  $n_*$ . Расчеты на живучесть не являются общепринятыми, поэтому мы оставляем для каната с дефектами термин «прочность», хотя в проблеме интерпретации данных



Таблица 1

**Нормативные коэффициенты запаса**

Показатель отбраковки	Новый канат	Канат с дефектами
На длине $6d$ — 10 обрывов	4,25	3,72
На длине $30d$ — 19 обрывов	4,25	3,37

дефектоскопии его нельзя признать вполне точным.

Для оценки допустимого уровня  $n_*$  возможен следующий порядок действий:

1) найти в нормативных документах браковочные показатели по числу обрывов и/или потере сечения для инспектируемого каната с учетом условий его эксплуатации (как правило, имеются несколько вариантов);

2) рассчитать предельные коэффициенты запаса прочности, каждый из которых соответствует определенному нормативному критерию браковки каната;

3) выбрать из полученного набора максимальный коэффициент (по отношению к нему расчетный ресурс будет заниженным).

В качестве примера поставим задачу подобрать крановый канат ГОСТ 2688—80 и оценить минимально допустимый запас прочности  $n_*$ , по достижении которого канат, согласно существующим нормам браковки [7], должен быть снят с эксплуатации.

Исходные параметры: группа механизмов М5, предел прочности проволок на разрыв  $\sigma_B = 1770 \text{ Н/мм}^2$ , максимальное натяжение  $S = 80 \text{ кН}$ , коэффициент использования (нормативный коэффициент запаса прочности нового каната)  $z_p = 4,0$ .

Согласно критерию  $F_0 \geq S \cdot z_p$  документа [7], выбирается канат ГОСТ 2688-80 диаметром  $d = 22,5 \text{ мм}$ , у

которого разрывное усилие в целом равно 333 кН.

Нормативные показатели браковки каната ГОСТ 2688-80 для механизма М5: на участке  $6d$  (один шаг свивки) — 10 обрывов, на участке  $30d$  — 19 обрывов.

Расчет минимально допустимого коэффициента запаса прочности  $n_*$  производится по программе *RopeStrength* при нагрузке 80 кН для равномерного распределения нормативного числа дефектов на соответствующих участках. Результаты приведены в табл. 1.

Допустимый уровень, на который будет ориентироваться прогноз ресурса по результатам дефектоскопии данного каната, может быть принят равным 3,72. Этот показатель идет в запас по надежности. Более рискованным является уровень 3,37. Компромиссным выбором представляется среднее значение 3,55.

Подчеркнем, что расчетные прогнозы сроков инспекций и ресурса носят рекомендательный характер. Вместе с тем, наряду с картиной изменения несущей способности, они дают дополнительную информацию, которая может пригодиться службе эксплуатации в принятии окончательного решения о судьбе каната.

Разработанная методика демонстрирует комплексный подход к анализу состояния эксплуатируемых канатов средствами инструментальной диаг-

ностики и методами механики конструкций. Прочностной расчет позволяет более реально оценить остаточную несущую способность каната с

учетом взаимодействия различных факторов, влияющих на его деградацию, и дать обоснованный прогноз индивидуального ресурса.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников В.С., Сухоруков В.В. Дефектоскопия канатов грузоподъемных машин // Безопасность труда в промышленности. – 1998. — №5. – С. 34 – 38.
2. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. Киев: Техника, 1966. 328 с.
3. Малиновский В.А. Стальные канаты: В 2 ч. Одесса: Астропринт. Ч. 1. – 2001. 188 с.; Ч. 2. – 2002. — 180 с.
4. 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. — Выпуск 3. — Одесса: Астропринт. – 2003. – С. 200 – 210.
5. A. Vorontsov, V. Volokhovsky, J. Halonen, J. Sunio. Prediction of operating time of steel wire ropes using magnetic NDT data. – OIPЕЕС Conference, Johannesburg. –2007. – P. 145-154.
6. Инструкция по эксплуатации стальных канатов в шахтных стволах (РД 03-439-02), Серия 03, Выпуск 13 // Колл. авт. — М.: НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России. 2002.
7. Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов: Сборник документов. Серия 10. Выпуск 7 / Колл. авт. – М.:ГУП «НТЦ Промышленная безопасность» Госгортехнадзора России, 2002. – 304 с.
8. Руководящий документ. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки. РД РОСЭК 012-97. – 49 с.
9. EUROPEAN STANDARD EN 12927-6-2004. Safety requirements for cableway installations designed to carry persons – Ropes – Part 6: Discard criteria. European Committee for Standardization. – 12 pp.
10. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. – 312 с. **ГИАБ**

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Воронцов Александр Николаевич — кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист отдела разработки, vorontsov@intron.ru,  
Волоховский Василий Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, руководитель группы прочности, volokhovsky@intron.ru,  
Слесарев Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, доцент, директор по проектированию, slesarev@intron.ru,  
ООО «Интрон Плюс».

