

Рис. 3. Зависимость статической осадки прессы и его собственной динамической частоты от давления в пневмоамортизаторах:

1 — статическая осадка прессы; 2 — собственная частота прессы

виброперемещение фундамента 0,08 мм; виброскорость фундамента до 1 мм/с. Замеры действующих вибраций подтвердили эффективность ви-

броизоляции прессы: парциальная частота колебаний виброизолирующей установки снижается в 4–7 раз, амплитуда колебаний фундамента прессы — до 10 раз, виброскорость — до 20 раз.

Эксплуатация виброизолирующих установок листоштамповочных прессов, за счет соответствующей частотной настройки, позволяет снизить генерируемые вибрации до неощутимого уровня и, соответственно, разместить прессовое оборудование на межэтажных перекрытиях. При этом вибрации в источнике удается снизить в 4–6 раз и привести их параметры в соответствие с санитарными нормами. Предложенные конструкции рекомендуются к широкому внедрению в листоштамповочных цехах.

Список литературы

1. Средства защиты в машиностроении. Расчет и проектирование: Справочник / С.В. Белов, А.Ф. Козьяков, О.Ф. Партолин и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 368 с.
2. Грибов М.М. Регулируемые амортизаторы радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1974. — 144 с.

ivsot@mail.ru

УДК 622.647.2:620.179.1

© А.Н. Воронцов, Д.А. Слесарев, В.Ю. Волоховский, 2009

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ



А.Н. Воронцов,
канд. техн. наук,
вед. специалист
отдела



Д.А. Слесарев,
канд. техн. наук,
директор по проектированию
(ООО «Интрон Плюс»)



В.Ю. Волоховский,
канд. техн. наук, руководитель группы

Для стальных несущих канатов, рассматриваемых как эксплуатируемые объекты, в теории надежности вводится понятие индивидуального остаточного ресурса, т.е. срока службы от данного момента времени до достижения предельного состояния [1]. Среди всех источников информации, которые используются для индивидуального прогноза ресурса, выделим данные текущего (опе-

ративно-го) поиска дефектов, которые накапливаются в результате наблюдений и измерений в процессе эксплуатации. Для стальных канатов по-

The article sets forth method of evaluating residual strength and individual resource of steel ropes with use of data of periodic test with magnetic defectoscopy method. The resource is calculated on the basis of strength factor, which is defined by calculating of strength mechanical model of the rope with defects. Input parameters of the models correspond to the measured defects, specifically: disruption of plies' profile in metal and break of wires. The paper gives examples of calculating resource of the straight rope and of the cable operating on a pulley.

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

добная диагностическая информация может быть получена средствами неразрушающего контроля, в частности методом магнитной дефектоскопии [2, 3]. Задача состоит в том, чтобы на основании данных дефектоскопии экстраполировать поведение каната в будущем и установить подходящий срок проведения следующей инспекции или момент прекращения его работы.

Диагностическими признаками (параметрами) стальных канатов считаются два вида регистрируемых дефектов: потеря площади сечения по металлу (ПС) относительно номинального значения вследствие износа прядей, коррозии или других причин; локальные дефекты (ЛД), например обрывы проволок. Оба дефекта уменьшают площадь сечения прядей, что ведет к снижению остаточной прочности каната. Работоспособное состояние канатов различного типа определяют согласно нормам браковки по допустимому значению ПС и (или) допустимому числу ЛД [4]. Однако предельные нормативные показатели не учитывают совместного влияния указанных дефектов на состояние каната, к тому же скорость накопления ПС и обрывов проволок в ходе работы конкретного каната в определенных условиях могут меняться в ту или другую сторону. Вследствие неопределенности ситуации методология прогнозирования ресурса каната по двум диагностическим параметрам в настоящее время отсутствует. Альтернативное решение — контроль каната с высокой частотой — экономически неоправданно.

Эти затруднения в значительной степени можно преодолеть, если оценивать ресурс не по диагностическим параметрам, а по параметрам состояния объекта. В качестве параметров состояния стального каната могут быть назначены коэффициенты запаса прочности по напряжениям и (или) усилиям, а также показатель остаточной прочности каната с дефектами по отношению к новому (бездефектному) канату. Связь между параметрами состояния и диагностическими признаками может быть установлена выбором подходящей механической модели каната. Параметры состояния рассчитывают по входным данным модели, т.е. количественным оценкам ПС и ЛД. Эти оценки зависят от чувствительности измерительных каналов дефектоскопа и алгоритма обработки ПС- и ЛД-дефектограмм.

Задачи прогнозирования работоспособности и долговечности, как правило, имеют вероятностный характер. Однако из-за отсутствия статистической информации о предельном состоянии вполне определенных канатов в конкретных ситуациях, а также априорных вероятностных оценок механических свойств и нагрузок в данной работе ограничимся детерминистическим прогнозом сроков очередных инспекций и индивидуального ресурса.

Остановимся вначале на роли прочностных расчетов в подборе стальных канатов, оценке их текущего рабочего состояния и работоспособности.

Канаты грузоподъемных машин и механизмов подбирают по сертифицированному разрывному усилию (предельной нагрузке) F_0 из условия $F_0 \geq Sz_p$, где S — максимальное рабочее натяжение ветви каната; z_p — минимально допустимый коэффициент использования каната, который имеет смысл нормативного коэффициента запаса прочности $[n]$ в механике материалов и конструкций. Предельную нагрузку (несущую способность, агрегатную прочность каната) F_0 определяют либо из испытаний на разрыв, либо простейшими расчетами на растяжение совокупности прямых проволок с поправочным коэффициентом винтовой структуры [5].

Влияние разнообразных факторов на предельное состояние каната обычно учитывают назначением заведомо высоких коэффициентов z_p . Это оборачивается, с одной стороны, выбором зачастую неоправданно толстого каната, с другой — эксплуатационными рисками. При растяжении с кручением или работе на блоках напряжения в прядях распределены крайне неравномерно, что объективно ведет к снижению ожидаемого потребителем запаса прочности выбранного каната. Не зная достоверного исходного запаса прочности, нельзя оценить срок службы. Если, к тому же, деформации и напряжения циклически меняются во времени, то усталостные эффекты, сопровождаемые накоплением повреждений в канате, существенно сокращают его реальный ресурс. Чем сложнее конструкция и условия работы, тем с меньшим основанием можно использовать традиционный критерий подбора каната.

Существующие нормы браковки канатов не содержат ни одного термина, касающегося прочности. Специалисты, занимающиеся механикой канатов, неоднократно призывали изменить существующее положение вещей [6, 7]. Речь идет о переходе к расчету по механическим моделям, которые позволяют более реально оценивать прочность канатов в специфических условиях. Такой подход ведет к решению двух проблем: во-первых, подбору нового каната с учетом характерной деформации конструкции, как принято в машиностроении, и, во-вторых, оценке его остаточного ресурса по прочностным показателям, которые определяют с использованием оперативной диагностической информации.

Наиболее разработанная, подтвержденная экспериментально и признанная инженерами — теория стальных канатов Глушко-Малиновского [7, 8]. Принятая в данной теории расчетная схема каната как гетерогенной структуры позволяет определить

напряженное состояние каждой проволоки при разнообразных условиях нагружения. Прочность каната, работающего при номинальном стационарном натяжении S , могут характеризовать следующие параметры:

коэффициент запаса по напряжениям в проволоках

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_u}{\max \sigma}, \quad (1)$$

где σ_u — маркировочная группа (предел прочности на разрыв материала проволок); $\max \sigma$ — максимальное напряжение, определяемое по модели Глушко для наиболее напряженной проволоки сечения каната с использованием соответствующего критерия прочности;

коэффициент запаса по предельным усилиям на канат

$$n_S = \frac{S_u}{S}, \quad (2)$$

где S_u — предельное усилие, при котором канат переходит в предельное состояние, иными словами исчерпывает свою несущую способность как конструкция.

Если на канат действует циклическая нагрузка, то запас прочности определяется как минимальный из оценок (1) или (2) и запаса на выносливость [9].

Вследствие неравномерного распределения напряжений по сечению каната наиболее нагруженный элемент (проволока, прядь и т.п.) обрывается при натяжении S , меньшем, чем значение S_u , которое соответствует разрушению всего каната. Коэффициент запаса n_{σ} , будучи меньше коэффициента n_S , косвенно учитывает влияние на прочность изменчивости свойств материала, разброса реальных нагрузок (в том числе динамических) относительно номинального значения S , условий закрепления каната, ограничений расчетной модели, погрешностей измерения и обработки данных диагностики и др. Поэтому расчет по напряжениям, в конечном итоге, более объективно отражает состояние каната и дает оценки, идущие в запас прочности.

Показателем текущего состояния каната может служить относительная остаточная прочность

$$\eta = \frac{\tilde{n}}{n},$$

где \tilde{n} и n — расчетный коэффициент запаса соответственно поврежденного и целого каната по напряжениям или усилиям (индексы опущены). Параметр η часто фигурирует в результатах испытаний канатов с дефектами на разрыв. Расчеты показывают, что в условиях, отличных от чистого растяжения, о прочности каната более правильно судить по значению абсолютного коэффициента запаса \tilde{n} [10].

Коэффициенты запаса n_S и n_{σ} для новых прямых канатов различной конструкции приведены в таблице. Данные отражают общую тенденцию снижения агрегатной прочности по отношению к суммарной прочности проволок с усложнением конструкции стандартных канатов [7]. Как было отмечено выше, реальный запас прочности каната, выбранного по коэффициенту $n_S = z_{pr}$ т.е. разрывному усилию, оказывается значительно ниже ожидаемого, если канат наряду с растяжением будет испытывать при эксплуатации кручение и (или) изгиб.

Прочность рабочего стального каната с дефектами будем характеризовать коэффициентом запаса по напряжениям $\tilde{n}(x, t)$ (x — продольная координата контролируемого участка, t — наработка каната, измеряемая в единицах времени, циклах нагружения и т.п.), который оценивается на основании данных текущей инструментальной и (или) визуальной диагностики.

Условие надежного функционирования каната выражается требованием

$$\min_x \tilde{n}(x, t) \geq n^*, \quad (3)$$

где $n^* \geq 1$ — допустимый остаточный запас прочности (живучести), который отражает приемлемый риск при эксплуатации каната с учетом повреждений. Он назначается, исходя из опыта работы аналогичных канатов в сходных условиях, или определяется пересчетом по механической модели нор-

Конструкция каната	S_u , кН	S , кН	σ_u , Н/мм ²	n_S	n_{σ}
6×19(1+6+6/6)+OC; $D = 36$ мм (ГОСТ 2688—80)	735,00	120	1570	6,13	6,05; 3,82
6×19(1+9+9)+OC; $D = 22$ мм (ГОСТ 3077—80)	315,00	50	1770	6,30	6,19; 3,97
6×36(1+7+7/7+14)+OC; $D = 46,5$ мм (ГОСТ 7668—80)	1300,00	230	1570	5,65	5,42; 3,67
6×19(1+9+9)+MC(6×7+1×7); $D = 12,5$ мм (ГОСТ 3081—80)	102,00	17	1670	5,98	5,45; 2,10
6×36(1+7+7/7+14)+MC(6×7+1×7); $D = 46,5$ мм (ГОСТ 7669—80)	1330,00	230	1570	5,78	4,98; 2,14
PYTHON 8×K19S(1+9+9)+PWRC(K) (4×19+4×7+1×7); $D = 11$ мм	127,24	25	2160	5,10	4,29; 1,03

Примечания. 1. Значения S_u , взятые из каталогов, соответствуют чистому растяжению (без кручения).

2. Коэффициент запаса n_{σ} рассчитан по теории Глушко при постоянной номинальной нагрузке для чистого растяжения (первое значение) и свободного растяжения, когда канат растягивается и одновременно закручивается или раскручивается (второе значение).

мативного браковочного числа обрывов и (или) ПС. Нарушение условия (3) означает отказ каната.

Обработанные при дискретных значениях наработки t_j ($j = 0, 1, 2, \dots$) ПС- и ЛД-дефектограммы служат данными для вычисления зависимостей $\bar{n}(x, t)$ и параметров прогноза $\bar{n}_j = \min \bar{n}(x, t_j)$. При текущей наработке t_j срок очередной инспекции и остаточный ресурс рассчитывают экстраполяцией средне-квадратического приближения показателей \bar{n} ($j \leq J$) ближайшей прочностной истории каната [11].

Теоретический прогноз сводится к ответам на вопросы:

1. Прекращать или продолжать эксплуатацию каната при текущей наработке t_j на основе анализа совокупности значений \bar{n} ($j \leq J$)?

2. Если продолжать эксплуатацию каната, то при каком значении наработки t_{j+1} необходимо проводить следующий контроль, какой ожидается коэффициент запаса \bar{n}_{j+1} и каков на данный момент остаточный ресурс каната по отношению к предельному значению n ?

На основе представленной методики разработано программное обеспечение Wintros/RopeStrength, которое по данным магнитной диагностики позволяет оценивать состояние рабочего каната с точки зрения прочности, планировать даты инспекций и давать рекомендательный прогноз индивидуального остаточного ресурса. Программа предназначена для расчета неподвижных и несущих канатов различного типа, работающих преимущественно на растяжение и растяжение с кручением, а также подвижных канатов, огибающих блоки, шкивы и барабаны при сочетании растяжения и циклического изгиба.

В качестве примера оценки прочности и ресурса приведем соответствующие данные для несущего закрытого каната конструкции 1+6+12+18+29Z+36Z (Австрия), который работал на подвесной дороге в Крыму. Диаметр каната 46 мм, номинальное натяжение 690 кН, предел прочности материала проволок на разрыв 1860 Н/мм², разрывное усилие каната в целом 2500 кН. Инструментальный контроль проводили дефектоскопом «ИНТРОС» (МГ 24-64) с мая 2001 г. по апрель 2009 г.

На рис. 1, а приведено изменение показателя остаточной прочности на участке контроля для трех наработок — начальной 1 (01.05.2001), промежуточной 2 (29.06.2006) и конечной 3 (09.04.2009). С течением времени уменьшается прочность каната и появляются очаги разрушения, обусловленные накоплением обрывов проволок: минимальное значение \bar{n} в 2001 г. составило 3,41 на отм. 1810,88 м; в 2006 г. — 3,32 на отм. 1810,93 м; в 2009 г. — 3,11 на отм. 1812,23 м.

Зависимость прочностных показателей каната от наработки, измеряемой в циклах нагружения,

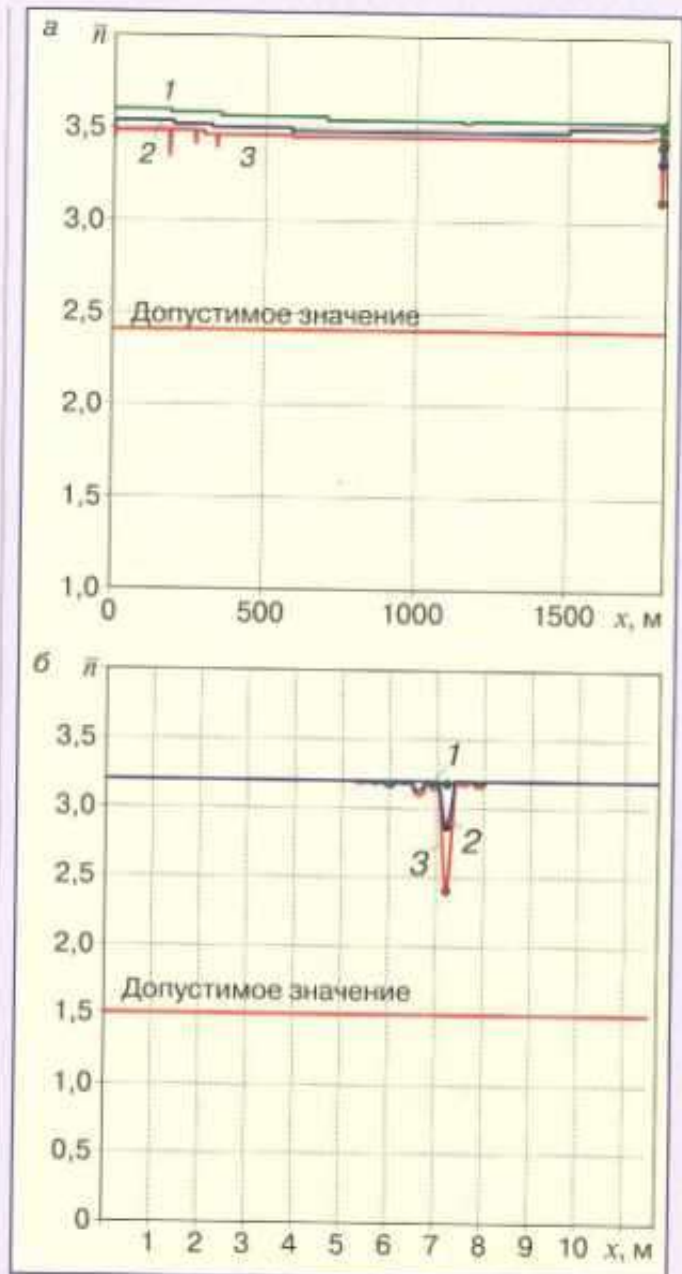


Рис. 1. Изменение показателя остаточной прочности канатов конструкций 1+6+12+18+29Z+36Z (а) и PYTHON 8xK19S(1+9+9)+PWRC(K)(4x19+4x7+1x7) (б) на участке контроля

продемонстрирована на рис. 2, а. Интегральные оценки соответствуют средним запасам прочности на участке контроля, минимальные — значениям, отмеченным кружками на рис. 1, а. Текущий прогноз наработки каната к моменту проведения следующей инспекции составляет 280 тыс. циклов, а коэффициент запаса ожидается равным 3,05.

Изменение ресурса каната по мере снижения несущей способности приведено на рис. 3, а. Прогнозируемые величины рассчитаны относительно допустимого значения 2,4, которое определяли согласно нормам браковки. Ресурс от начала эксплуатации (464 316 циклов) — сумма наработки и остаточного ресурса (204 316 циклов).

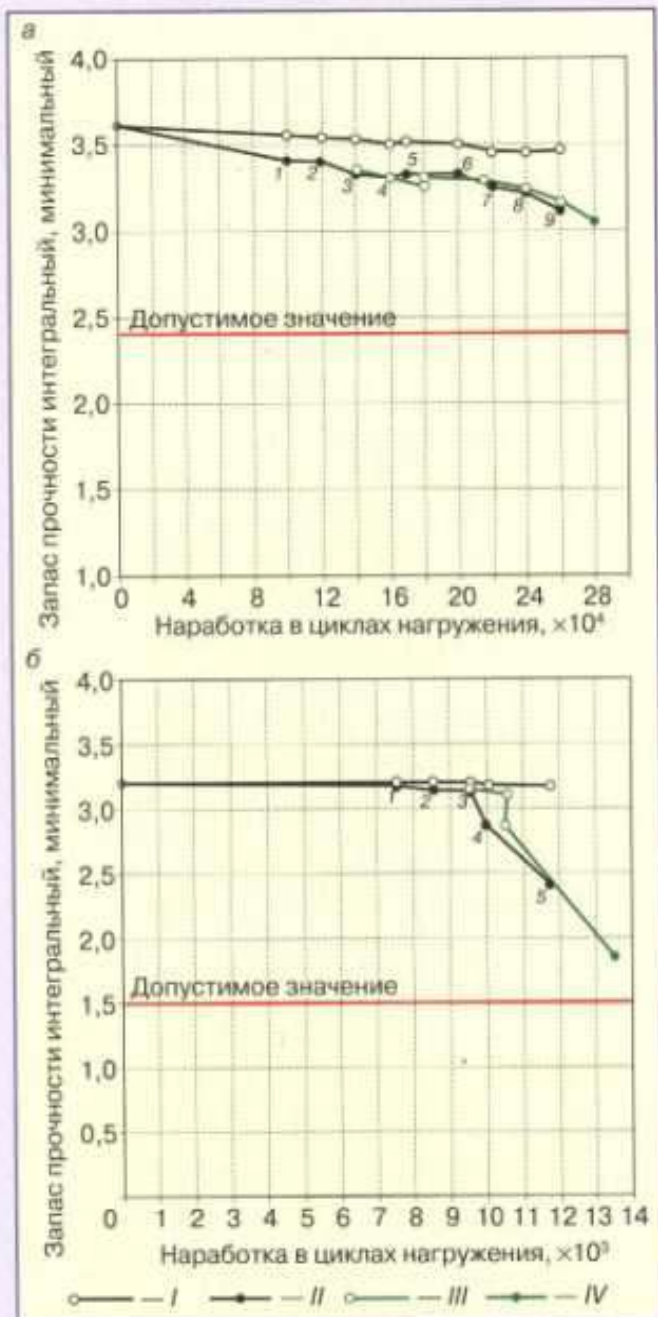


Рис. 2. Зависимость прочностных показателей от наработки каната:

а — конструкции 1+6+12+18+29Z+36Z (1-9 — дата обследования: соответственно 21.05.2001; 16.06.2002; 15.04.2003; 30.06.2004; 08.09.2005; 29.06.2006; 30.06.2007; 22.10.2008; 09.04.2009); б — конструкции PYTHON 8xK19S(1+9+9) + PWRC(K)(4x19+4x7+1x7) (1-3 — 27.06.2007 соответственно начало, середина и конец дня; 4, 5 — 02.10.2007 соответственно начало и конец дня); I, II — оценки соответственно интегральные и минимальные; III, IV — прогнозы инспекций соответственно предыдущие и текущий

Аналогичные данные для каната, работающего на блоке в условиях растяжения и циклического изгиба, представлены на рис. 1, б; 2, б и 3, б. Канат конструкции PYTHON 8xK19S (1+9+9) + PWRC(K) (4x19+4x7+1x7) проходил обследования дефекто-



Рис. 3. Изменение ресурса в процессе эксплуатации каната:

а — конструкции 1+6+12+18+29Z+36Z (1 — 16.06.2002; 2 — 15.04.2003; 3 — 30.06.2004; 4 — 08.09.2005; 5 — 29.06.2006; 6 — 30.06.2007; 7 — 22.10.2008; 8 — 09.04.2009); б — конструкции PYTHON 8xK19S(1+9+9) + PWRC(K)(4x19+4x7+1x7) (1, 2 — 27.06.2007; 3, 4 — 02.10.2007); I — наработка; II — остаточный ресурс; III — ресурс на начало эксплуатации

скопом «ИНТРОС» (МГ 6-24) в лаборатории фирмы KCI (Финляндия); диаметр каната 8 мм, диаметр блока 350 мм, номинальное натяжение 10 кН, предел прочности материала проволок на разрыв (маркировочная группа) 2160 Н/мм².

Минимальное значение \bar{y} при обследовании, выполненном 27.06.2007 (1), равно 3,18 на отм. 7,22 м, 02.10.2007 в начале дня (2) — 2,86 на отм. 7,21 м, а 02.10.2007 в конце дня (3) — 2,41 на отм. 7,23 м

(см. рис. 1, б). Текущий прогноз очередной инспекции составил 13 508 циклов, при этом ожидаемый коэффициент запаса равен 1,85 (см. рис. 2, б). Остаточный ресурс — 2849 циклов, ресурс от начала эксплуатации — 14 627 циклов (см. рис. 3, б).

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 работоспособности каната.

Для повышения надежности и безопасности грузоподъемных машин и механизмов необходимо систематически внедрять прочностные расчеты в разработку новых конструкций стальных канатов, практику подбора канатов для конкретных условий и методики оценки их работоспособности по данным неразрушающего контроля. Разработанное инструментальное и программное обеспечение позволяет эффективно контролировать состояние стальных канатов и оценивать их индивидуальный ресурс по объективным прочностным показателям.

Список литературы

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1984. — 312 с.
2. Котельников В.С., Сухоруков В.В. Дефектоскопия канатов грузоподъемных машин // Безопасность труда в промышленности. — 1998. — № 5. — С. 34–38.

3. РД 03-348–00. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Основные положения // Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов: Сб. док. / Колл. авт. — Сер. 10. — Вып. 7. — М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2005. — С. 262–281.

4. РД РОСЭК 012–97. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки. — М.: РОСЭК, 1997. — 49 с.

5. Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов: Сб. док. / Колл. авт. — Сер. 10. — Вып. 7. — М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», — 2002. — 304 с.

6. Чаюн И.М., Седаков Д.В., Чаюн М.И. Расчетный и нормативный коэффициенты запаса прочности канатов // Стальные канаты: Сб. статей. — Одесса: Астропринт, 1999. — С. 30–37.

7. Малиновский В.А. Стальные канаты. — Одесса: Астропринт, 2001, 2002. — Ч. 1–2.

8. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. — Киев: Техника, 1966. — 328 с.

9. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. — М.: Машиностроение, 1975. — 488 с.

10. Воронцов А.Н., Волоховский В.Ю., Морин И.Ю. Прочностные показатели технического состояния стальных канатов // Стальные канаты: Сб. статей. — Вып. 6. — Одесса: Астропринт, 2008. — С. 284–293.

11. Prediction of operating time of steel wire ropes using magnetic NDT data / A. Vorontsov, V. Volokhovskiy, J. Halonen, J. Sunio // OIPEEC Conference. — Johannesburg, 2007. — P. 145–154.

vorontsov@intron.ru

Экспертный научно-технический центр «ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ»



**ЭКСПЕРТИЗА
ПРОМЫШЛЕННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ**

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

СЕРТИФИКАЦИЯ

ИТМ ГО ЧС

АТТЕСТАЦИЯ ПО ПБ

WWW.DICON.SU

115191, Россия, г. Москва,
4-й Рошинский проезд, д. 19
(ВНИИТЕМАШ)
тел.: +7 (495) 785-01-10
+7 (495) 940-93-50
info@dicon.su

ЖИЗНЬ ПРЕКРАСНА, КОГДА БЕЗОПАСНА!

Лицензии Ростехнадзора на право осуществления деятельности по проведению экспертизы промышленной безопасности № ДЗ-00-007203 (ДЖЗКНПСХ), № ДЗ-00-008519 (ГМ)
Лицензия Управления ФСБ России, ГТ № 0002124