

4. Gudremont E. Spetsialnye stali. Tom I-II (Special steels. Volume I-II). Moscow : Metallurgiya, 1966. 1274 p.
5. Gulyaev A. P. Metallovedenie (Physical metallurgy). Moscow : Metallurgiya, 1986. 544 p.
6. Saltykov S. A. Stereometricheskaya metallografiya (Stereometric metallography). Moscow : Metallurgiya, 1976. pp. 120–122.

7. Gorelik S. S., Rastorguev L. N., Skakov Yu. A. Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz (X-ray and electron-optical analysis). Moscow : Metallurgiya, 1970. 366 p.
8. Malykhin D. G., Korneeva V. V., Starolat M. P. Visnik Kharkivskogo universitetu, seriya fizichna: "Yadra, chastinki, polya" — Journal of Kharkiv University, physical series: "Nucleous, particles, fields". 2009. No. 845, Iss. 1(41). pp. 77–81.

 **ООО «ИНТРОН ПЛЮС»**

В. В. Сухоруков, А. Н. Воронцов, В. Ю. Волоховский*

УДК 620.179.1:677.72

Контроль износа канатов заливочных кранов металлургических предприятий

Грузовые канаты литейных заливочных кранов в конвертерных цехах металлургических заводов подвергаются воздействию высоких температур вследствие теплового излучения и выбросов пламени при заливке жидкого чугуна из ковша в конвертер (рис. 1). При нарушении технологии заливки или инструкций по подготовке металлолома температура внешних проволок каната может достигать 700–800 °С и более.

Высокотемпературные воздействия вызывают формирование в металле проволок отожженной структуры и значительное снижение микротвердости сорбитной составляющей [1], что приводит к ухудшению механических свойств стали. Структурная деградация обычно сопровождается абразивным износом проволок. Подобные условия работы достаточно рискованны для каната как несущей механической конструкции. Поэтому производители канатов, руководствуясь нормативными документами (например, [2, 3]) рекомендуют не применять на грузовых кранах стальные проволочные канаты при рабочих температурах более 450 °С. В противном случае возможны аварии механизма подъема, когда обрыв ветви каната приводит к падению траверсы с ковшом и разливу жидкого чугуна [4].

* Докт. техн. наук В. В. Сухоруков, профессор, президент компании; канд. техн. наук А. Н. Воронцов, доцент, ведущий специалист отдела разработки; канд. техн. наук В. Ю. Волоховский, доцент, ведущий специалист отдела разработки, компания ООО «ИНТРОН ПЛЮС», Москва, Россия; avorontsov@intron.ru

В статье рассмотрена проблема безопасной эксплуатации стальных канатов заливочных подъемных кранов на металлургических предприятиях. Методом магнитной дефектоскопии исследована прогрессирующая деградация металла проволок при периодических высокотемпературных воздействиях. Техническое состояние каната характеризуется коэффициентом запаса прочности, который зависит от температурного режима эксплуатации. Для оценки предельной разрушающей нагрузки предложена механическая модель, учитывающая влияние термоциклирования на прочность каната. Разработан двухпараметрический критерий, позволяющий заранее установить возможность безопасной эксплуатации каната при известной технологии заливки чугуна в конвертер.

Ключевые слова: канат заливочного крана, неразрушающий контроль, температурный режим, запас прочности, критерий технического состояния.

Регламент обследования технического состояния каната должен опираться на три составляющие: температурный критерий допустимых режимов, программу диагностики и условия браковки. В данной статье представлен систематический подход к решению этой задачи, который включает следующие мероприятия:

- контроль (дефектоскопию) каната для обнаружения признаков наступления критического состояния;
- испытание на растяжение отработавшего каната и/или отдельных его проволок;
- лабораторные измерения нестационарных температурных полей в конструкции каната;
- натурные измерения температуры внешних проволок при заливках;
- теоретический анализ изменения прочности каната при комбинированном силовом и температурном циклическом нагружении.

Магнитная дефектоскопия канатов заливочных кранов

Компания «ИНТРОН ПЛЮС» в течение длительного времени использует магнитный дефектоскоп ИНТРОС собственного производства для инспекции работающих канатов заливочных кранов [5]. Дефектоскоп регистрирует магнитный поток вдоль оси каната и определяет его отклонение, вызываемое механическим износом и изменением магнитных свойств под влиянием высоких температур [6]. Это отклонение количественно характеризует деградацию каната в виде обобщенного диагностического показателя DV , который измеряется в % (усл.) по аналогии с относительной потерей металлического сечения каната при обычных температурах.

Дефектоскопия проводится периодически на остывших канатах между последовательными заливками после регламентированного числа термоциклов (наработок). Термоцикл соответствует одному акту заливки, начиная с доставки чугуново-возного ковша в конвертерный цех и заканчивая его транспортировкой из цеха. Изменение диагностического параметра DV с ростом числа термоциклов (заливок) для канатов трех литейных кранов на одном из металлургических предприятий РФ приведено на рис. 2. Каждая кривая относится к определенному канату по ТУ 14-4-273-2002 диаметром 42 мм конструкции $6 \times 25(1+6; 6+12) + 7 \times 7(1+6)$, который за эксплуатационный период систематически контролировался дефектоскопом ИНТРОС (МГ 24-64). Проволока изготовлена из стали 70 по ТУ 14-1-5317-95 класса ВК (высококачественная канатная). Режим работы крана: среднее число заливок в сутки — 30; среднее полное время одной заливки — 4,5 мин; средняя продолжительность высокотемпературного воздействия на канат — 3 мин.

На всех зависимостях прослеживаются три стадии деградации каната, сходные с типичными кривыми ползучести: начальная неустойчивая стадия, установившаяся стабильная и финальная ускоренная. Последние точки каждого графика соответствуют снятию канатов с эксплуатации вследствие «пережога» проволок. На начальной стадии происходит преобразование исходной микроструктуры проволок благодаря влиянию высоких температур. В стабильном состоянии постепенно усиливается термическое охрупчивание стали и снижается прочность проволок на разрыв. Структурная деградация всех канатов начинает заметно возрастать, когда диагностический параметр DV достигает значения 4–5 %. Можно предположить, что в этот момент возникает некоторый источник возмущения магнитного поля, общий почти для всех канатов, который провоцирует рост диагностического сигнала. Он появляется при различном количестве термоциклов, так как канаты на разных кранах подвергались неодинаковым температурным воздействиям. Наиболее вероятно, что в отмеченном состоянии концентрация микродефектов стремится к критическому пороговому значению, что приводит к преобразованию внутрикристаллических трещин в магистральные межкристаллитные дефекты. Данный вопрос требует дополнительного изучения.



Рис. 1. Канаты механизма главного подъема заливочного крана

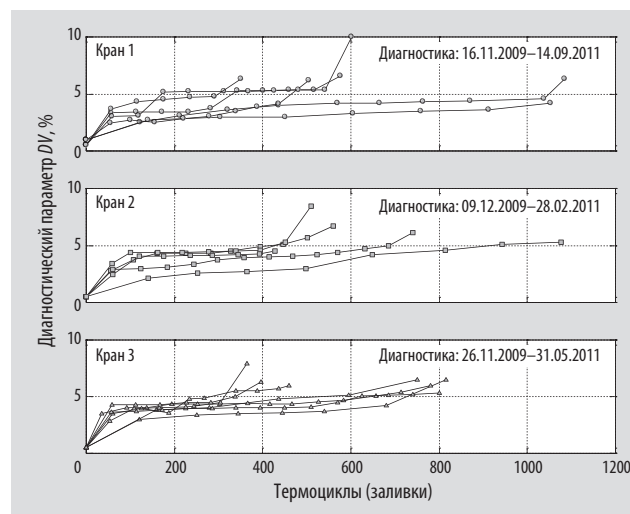


Рис. 2. Изменение диагностического параметра канатов заливочных кранов в процессе наработки

Оценки диагностического параметра DV канатов, снятых с эксплуатации			
Параметры	Кран 1	Кран 2	Кран 3
Число канатов	44	28	35
Максимальное DV при отбраковке, %	11,28	12,75	12,71
Среднее DV при отбраковке, %	7	6,79	6,81
Среднее DV при отбраковке (по всем канатам), %	6,87		

Сводка значений диагностического параметра DV , которые соответствуют отбраковке всех проинспектированных канатов на трех заливочных кранах, приведена в таблице.

Экспериментальное изучение прочности отбракованных канатов

Влияние термоциклического воздействия на работающий канат характеризуется пиковой номинальной темпера-

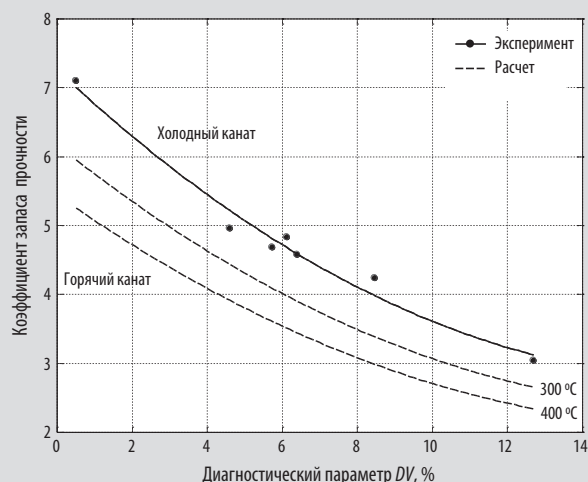


Рис. 3. Зависимость между запасом прочности канатов заливочных кранов и диагностическим параметром магнитной дефектоскопии

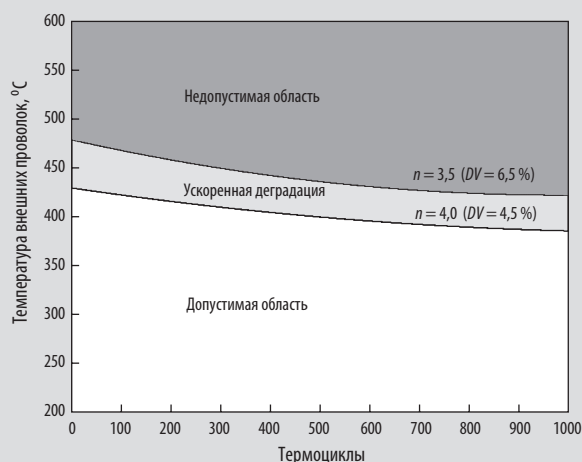


Рис. 4. Области температурных режимов работы стальных канатов заливочных кранов

турой T внешних проволок и количеством термоциклов N . Остаточную прочность каната можно оценить коэффициентом запаса $n(T, N)$ в виде отношения между разрушающей (предельной) нагрузкой $P_u(T, N)$ и номинальным рабочим натяжением каната P :

$$n(T, N) = P_u(T, N) / P.$$

Номинальное натяжение грузового каната заливочного крана $P = 174$ кН. С целью определения зависимости между запасом прочности $n(T, N)$ и диагностическим параметром DV провели испытания отбракованных канатов без расплетения их на проволоки на разрывной машине УММ-200. Среднее разрывное агрегатное усилие нового каната при навеске $P_{u,0} = 1338$ кН.

Зависимости между коэффициентом запаса $n(T, N)$ и параметром DV , полученные обработкой данных экспериментов и теоретическим расчетом с учетом снижения прочности

стальных проволок при температурах 300 и 400 °C [7, 8], показаны на рис. 3. Несущая способность «горячего» каната меньше, чем у «холодного», разорванного после эксплуатации. Запас прочности 3,8–4 при $T = 400$ °C соответствует наступлению ускоренной стадии деградации каната (см. рис. 2).

Теоретическая оценка несущей способности каната при высокотемпературных воздействиях

Для моделирования процесса конструкции каната представили в виде двух стержней, каждый из которых растягивается вдоль своей оси на одну и ту же величину. Стержень 1 моделирует группу проволок внешних прядей каната (внешние проволоки), стержень 2 — группу проволок сердечника. Предельное состояние каната определяется отказом (разрывом) одной из этих структурных компонент.

Пусть $\Delta T = T_1 - T_2 > 0$ — средний перепад температуры между группой внешних проволок и группой проволок сердечника в процессе заливки чугуна из ковша в конвертер. Лабораторные опыты с быстрым нагревом от комнатной температуры каната диаметром 42 мм, погружаемого в тигель с расплавленным свинцом, свидетельствуют, что в течение первых 1,5 мин перепад ΔT достигает 200 °C.

Принято допущение, что в данном температурном режиме заливки модуль упругости стали E и коэффициент температурного расширения α остаются постоянными. $\sigma_{u,T}(T, N)$ — временное сопротивление проволок, которые на протяжении времени заливки нагревались до температуры T в течение N термоциклов. Данный механический параметр определяется из опытов на «горячее» растяжение проволок в испытательной машине с печью. В температурном диапазоне 200–400 °C значение $\sigma_{u,T}(T, N)$ меньше соответствующего параметра $\sigma_u(T, N)$ «холодного» (остывшего) каната на 25–35 %, и оно уменьшается постепенно с ростом числа термоциклов N .

В рамках принятой модели средние результирующие напряжения от натяжения и температуры во внешних проволоках σ_1 и проволоках сердечника σ_2 определяются по формулам

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} - \frac{E\alpha\Delta T A_2}{A}; \quad \sigma_2 = \frac{P}{A} + \frac{E\alpha\Delta T A_1}{A},$$

где A_1 и A_2 — площади сечений по металлу внешних проволок и сердечника каната соответственно ($A = A_1 + A_2$).

Расчеты показали, что в процессе заливки выполняется следующее соотношение между предельными и рабочими напряжениями в двух группах проволок:

$$\sigma_{u,T}(T_2, N) - \sigma_2 \leq \sigma_{u,T}(T_1, N) - \sigma_1.$$

Следовательно, при росте натяжения ветви каната первым обрывается его сердечник. Соответствующая предельная нагрузка «горячего» каната может быть определена по формуле

$$P_{u,T} = k[\sigma_{u,T}(T_2, N)A_2 + (\sigma_{u,T}(T_2, N) - E\alpha\Delta T)A_1],$$

где $k = 0,9 \div 0,92$ — эмпирический коэффициент, который определяется из данных испытаний на растяжение целых канатов и отдельных проволок.

Оценочный расчет запаса прочности $n(T, N)$ «горячего» рабочего каната выполнен для следующих параметров: $T_1 = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $N = 1$, $E = 2 \cdot 10^5\text{ МПа}$, $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $A_1 = 750\text{ мм}^2$, $A_2 = 110\text{ мм}^2$, $P = 174\text{ кН}$, $\sigma_{u,T}(T_1, N) = 1312\text{ МПа}$, $\sigma_{u,T}(T_2, N) = 1757\text{ МПа}$. Средние напряжения во внешних проволоках и проволоках сердечника $\sigma_1 = 141\text{ МПа}$, $\sigma_2 = 621\text{ МПа}$; разрывное усилие «горячего» каната $P_{u,T} = 958\text{ кН}$ (на 28,4 % меньше разрывного усилия $P_{u,0} = 1338\text{ кН}$ для нового каната в состоянии поставки); коэффициент запаса прочности в рабочем состоянии $n = 958/174 = 5,5$ вместо $n_0 = 1338/174 = 7,7$ для нового каната.

Температурный критерий безопасной эксплуатации каната

Для определения возможности работы каната в известных производственных условиях необходимо построить области его допустимых и недопустимых состояний в координатах (T, N) . В связи с неопределенностью влияния циклических температурных нагрузок на магнитные и/или механические свойства металла проволок трудно провести четкую границу между допустимыми и недопустимыми условиями эксплуатации. Поэтому критерий имеет интервальный характер, когда две альтернативные области температурных режимов отделены друг от друга так называемой буферной (переходной) зоной (рис. 4).

Верхняя граница переходной области ($n = 3,5$, $DV = 6,5\%$) соответствует температурным режимам, при которых канаты снимают с эксплуатации из-за «пережога» проволок. На этом основании предельное (критическое) значение диагностического параметра DV_u может быть назначено равным $7 \pm 0,5\%$.

Для большей достоверности прогноза состояния каната температуру внешних проволок T следует измерять контактным способом, так как инфракрасная термометрия дает большие погрешности вследствие влияния температурных полей окружающей среды.

Необходимыми условиями безопасной работы каната являются два требования: температурные параметры (T, N) принадлежат допустимой области, и измеренный диагностический показатель DV меньше предельного значения $DV_u = 7 \pm 0,5\%$. Канат должен быть заменен, если хотя бы одно из этих требований нарушено. Канат может продолжать работать в переходной области, однако в этом случае требуется более частая инспекция для проверки условия $DV < DV_u$. Данный интервальный критерий был использован при разработке регламента магнитной дефектоскопии канатов механизма главного подъема заливочных кранов на одном из металлургических предприятий РФ. Динамика запаса прочности в процессе наработки, рассчитанная по данным дефектоскопии, является объективной характеристикой для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса каната [9].

Выводы

1. Рассмотренный в данной статье подход может служить основой для выработки инструкции по безопасной эксплуатации канатов грузового подъема заливочных кранов в конвертерных цехах.

2. Прочность каната зависит от влияния температурного режима заливок на физические и механические свойства металла проволок. Состояние каната следует периодически контролировать (например, методом магнитной дефектоскопии) для выявления признака наступления ускоренной деградации его несущей способности.

3. Теоретический расчет, основанный на данных неразрушающего контроля и механических испытаний каната или проволок в горячем состоянии, дает удовлетворительную оценку запаса прочности рабочего каната, снижая тем самым риски при эксплуатации заливочного крана.

4. Эксплуатация каната недопустима, если температура его поверхности сохраняется выше $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении нескольких заливок. В подобных экстремальных условиях изложенные принципы и критерии безаварийной работы недействительны. ЧМ

Библиографический список

1. Горицкий В. М. Тепловая хрупкость стали. — М.: Металлургия, 2007. — 384 с.
2. ISO 4309:2010 Cranes — Wire Ropes — Care, Maintenance, Installation, Examination and Discard, Berlin: Beuth Verlag, 2010.
3. Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов // Сборник документов. Серия 10. Выпуск 7/ Колл. авт. — М.: ГУП «НТЦ Промышленная безопасность» Госгортехнадзора России, 2002. — 304 с.
4. Малов В. П., Кузьминов А. Л., Попов В. Г. и др. Влияние термоциклических нагрузок на прочность каната литейных кранов // Безопасность труда в промышленности, 1999. № 11. С. 30–32.
5. Котельников В. С., Сухоруков В. В. Дефектоскопия стальных канатов грузоподъемных кранов, подверженных тепловому воздействию // Безопасность труда в промышленности. 2003. № 8. С. 19–21.
6. Мельгуй М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей. — Минск: Наука и техника, 1980. — 180 с.
7. Матюнин В. М., Волоховский В. Ю., Воронцов А. Н. Изменение механических свойств проволок грузовых канатов литейных кранов под воздействием эксплуатационных факторов // Технология металлов. 2011. № 7. С. 14–19.
8. Chen Yu., Young B., Uy B. Behavior of High Strength Structural Steel at Elevated Temperatures // Journal of Structural Engineering, 2006. 132(12). P. 1948–1954.
9. Воронцов А. Н., Слесарев Д. А., Волоховский В. Ю. и др. Диагностические показатели стальных канатов как исходные данные прогноза остаточного ресурса // Контроль. Диагностика. 2010. № 5. С. 30–34.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

CONTROL OF HOISTING ROPE WEAR FOR HOT-METAL CRANES OF METALLURGICAL ENTERPRISES

Sukhorukov V. V.¹, Dr. Eng., Prof., PresidentVorontsov A. N.¹, Cand. Eng., Assist. Prof., Leading Specialist of Research Dept.Volokhovskiy V. Yu.¹, Cand. Eng., Assist. Prof., Leading Specialist of Research Dept.¹ "Intron Plus" JSC (Russia, Moscow)

E-mail: avorontsov@intron.ru

Abstract: The problem of safe operation of hot metal hoisting ropes in metallurgical works is investigated. The ropes of traveling cranes are subjected to cyclic tension and high level thermal action whenever the molten metal is being poured from the ladle into a converter. During the periodical lading the ropes are affected by thermal shocks that gradually change a high carbon wires microstructure which leads to deterioration of their mechanical properties. The structural degradation is accompanied by abrasive wear of the wires. Such heavy duty leads to a great risk regarding the rope bearing capacity. On this point the periodical testing of the ropes technical state in service is of a great importance. The aim of paper is to develop the rope monitoring policy that includes the prior thermocyclic safety criterion, the rope NDT schedule and discard requirements. Several ways are used to attain this purpose: non-destructive examination of rope health after periodical ladlings to reveal the signs of ultimate state coming; tensile breaking tests of individual wires and entire ropes that have been discarded; laboratory and in-situ measurements of temperature field at rope cross-section exposed to thermal shock and theoretical analysis of rope safety factor under combined power-thermocycling loading. Based on the dependence of rope safety factor and magnetic diagnostic parameter, the rope state feature "allowable-caution-prohibited" is proposed.

Two-parameter thermal criterion is used to estimate the rope technical condition under supposed foundry rate and to set the rope testing regulations. The presented procedure sets out a practical guide for maintaining the reliability of steel ropes working in hot environments.

Key words: hot metal crane rope, high-temperature loading, non-destructive testing, tensile strength, safety factor, operating state criterion.

References:

1. Goritskiy V. M. Teplovaya khrupkost stali (Thermal brittleness of steel). Moscow : Metallurgizdat, 2007. 384 p.
2. ISO 4309:2010 Cranes — Wire Ropes — Care, Maintenance, Installation, Examination and Discard. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
3. Promyshlennaya bezopasnost pri ekspluatatsii gruzopodemnykh kranov (Industrial safety during the exploitation of hoisting cranes). Collection of documents. Series 10. Iss 7. Group of authors. Moscow : Scientific Technical Center "Industrial Safety" of Federal Mining and Industrial Inspectorate of Russia, 2002. 304 p.
4. Malov V. P., Kuzminov A. L., Popov V. G. et al. Bezopasnost truda v promyshlennosti — Labor safety in industry. 1999. No. 11. pp. 30–32.
5. Kotelnikov V. S., Sukhorukov V. V. Bezopasnost truda v promyshlennosti — Labor safety in industry. 2003. No. 8. pp. 19–21.
6. Melguy M. A. Magnitnyy kontrol mekhanicheskikh svoystv staley (Magnetic control of mechanic properties of steels). Minsk : Nauka i tekhnika, 1980. 180 p.
7. Matyunin V. M., Volokhovskiy V. Yu., Vorontsov A. N. Tekhnologiya Metallov — Technology of metals. 2011. No. 7. pp. 14–19.
8. Chen Yu., Young B., Uy B. Behavior of High Strength Structural Steel at Elevated Temperatures. Journal of Structural Engineering. 2006. 132(12). pp. 1948–1954.
9. Vorontsov A. N., Slesarev D. A., Volokhovskiy V. Yu. et al. Kontrol. Diagnostika — Testing. Diagnostics. 2010. No. 5. pp. 30–34.

Москва, Ленинский проспект, д. 6; тел.: (495) 638-45-18; эл. почта: manager@rudmet.ru www.rudmet.ru

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ

КАЧЕСТВЕННО. ПРАКТИЧНО. ДОСТАТОЧНО.

Горный журнал • Цветные металлы • Черные металлы • Обогащение руд • Горный мир
Eurasian Mining • Non-Ferrous Metals • CIS Iron & Steel Review

Реклама



Издательский дом
«Руда и Металлы»