

Анализ эксплуатационной надежности грузовых канатов заливочных кранов сталеплавильного производства



В.Ю. Волоховский,
канд. техн. наук, доцент,
руководитель группы,
volokhovskiy@intron.ru



А.Н. Воронцов,
канд. техн. наук, доцент,
вед. сотрудник



И.И. Шпаков,
руководитель
группы



В.В. Гончаров,
руководитель
службы

ООО «ИНТРОН ПЛЮС», Москва, Россия

ПАО «Северсталь», Череповец,
Россия

При выполнении технологических операций заливки чугуна в конвертер стальные канаты мостовых заливочных кранов в цехах сталеплавильного производства подвергаются циклическому силовому и высокоинтенсивному тепловому нагружению. В статье отражены результаты лабораторных экспериментов и натурных испытаний по изучению влияния эксплуатационных факторов на работоспособность канатов грузового подъема заливочных кранов в условиях цеха выплавки конвертерной стали ПАО «Северсталь». Обсуждается практика применения магнитного метода неразрушающего контроля для диагностирования стальных канатов. Приведены рекомендации по организации мониторинга, коррекции предельного значения допустимой потери сечения по металлу и продлению нормативного ресурса грузовых канатов механизмов главного подъема заливочных кранов.

Ключевые слова: заливочные краны, стальные канаты, магнитная дефектоскопия, регламент контроля, эксплуатационный дефект, нормативный ресурс.

Для цитирования: Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н., Шпаков И.И., Гончаров В.В. Анализ эксплуатационной надежности грузовых канатов заливочных кранов сталеплавильного производства // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 7–16. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-7-16

Введение

Грузовые канаты главного подъема заливочных кранов конвертерных цехов металлургических заводов работают в тяжелых эксплуатационных условиях. Канаты подвергаются воздействию высоких температур вследствие теплового излучения транспортируемого в ковше жидкого чугуна, а также выбросов пламени при его заливке в конвертер (рис. 1). В случае нарушения технологии процесса заливки или инструкций по подготовке металлолома к плавке температура наружных проволок может достигать 200–400 °С и более, что ведет к ускоренной деградации несущей способности каната.

Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности [1] не содержат прямых указаний относительно предельных температур, до которых разрешен нагрев стальных канатов. Един-

ственным документом Ростехнадзора, в котором приведены ограничения по верхнему пределу температуры эксплуатации стальных канатов, является РД 10-231–98 [2]. В п. 2.1.9 [2] введены ограничения на нагрузочную способность стропов из стальных канатов с металлическим сердечником. В международном стандарте ISO 4309:2017(E) [3] также не отражены ограничения по температуре стальных канатов в процессе эксплуатации. Как в отечественных, так и в зарубежных нормативно-технических документах отсутствуют количественные ограничения на изменение прочностных характеристик стальных канатов в зависимости от характера и уровня эксплуатационных термовоздействий. Поэтому производители канатов рекомендуют не применять на грузовых кранах стальные проволочные канаты из углеродистой стали при рабочих температурах выше 450 °С [4, 5].



▲ Рис. 1. Заливка жидкого чугуна в конвертер
▲ Fig. 1. Pouring-in of molten iron into the converter

Обычный режим работы крана включает 25–30 заливок в сутки при средней продолжительности высокотемпературного воздействия на канат около 3 мин. Циклический характер грузовых и термических нагрузок на канаты приводит к изменению механических свойств материала проволок и ускоренному снижению несущей способности каната. Иногда случаются и аварийные ситуации вследствие обрывов канатов заливочных кранов [6]. Поэтому периодический мониторинг технического состояния (ТС) грузовых канатов средствами неразрушающего контроля (НК) является важнейшей составляющей мероприятий, которые персонал сталеплавильных цехов проводит в целях обеспечения надежности и безопасности работы заливочных кранов. Практика показывает, что наиболее распространенный эксплуатационный дефект грузовых канатов заливочных кранов в конвертерных цехах — это потеря сечения (ПС) по металлу из-за коррозионного, абразивного и фрикционного износов проволок. Локальные дефекты (ЛД) типа обрывов проволок и (или) прядей канатов встречаются крайне редко. Эффективным инструментальным средством НК стальных канатов и диагностирования как наружных, так и внутренних дефектов типа ПС и ЛД являются дефектоскопы, реализующие метод регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих вблизи нарушений однородности намагниченного каната из ферромагнитной стали.

Порядок мониторинга и нормы браковки канатов заливочных кранов цеха выплавки конвертер-

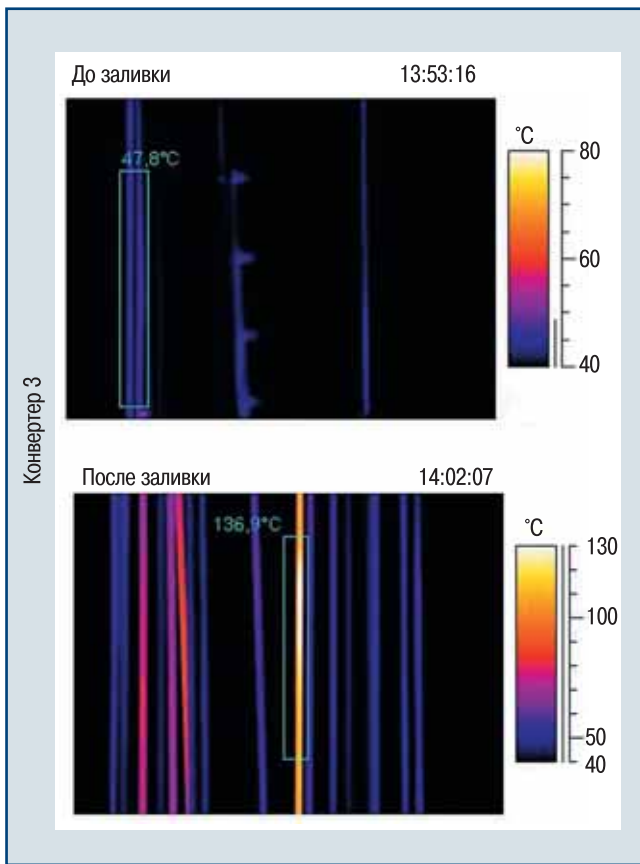
ной стали (ЦВКС) ПАО «Северсталь» определяются внутренним документом «Регламент осмотра и выбраковки грузовых канатов механизмов главного подъема заливочных кранов» (далее — Регламент), утвержденным 02.07.2009.

Для контроля ТС грузовых канатов трех заливочных кранов в ЦВКС более 15 лет используют магнитные дефектоскопы «ИНТРОС» [7, 8]. Канаты диагностируют специалисты сервисной службы (ООО «Промсервис»). Периодичность дефектоскопии составляет 50–60 заливок (плавов). Результаты контроля износа грузовых канатов заливочных кранов с применением дефектоскопа «ИНТРОС» в условиях ЦВКС приведены в [9, 10].

В марте 2017 г. в ЦВКС на одном из кранов для опытной эксплуатации был стационарно установлен автоматизированный магнитный дефектоскоп «ИНТРОС-АВТО» [11, 12], в котором идентификация дефектов, определение их числа и параметров, а также анализ текущего ТС контролируемого объекта на соответствие критериям годности по диагностическим параметрам ПС и ЛД, выполняются автоматически. Машинист крана без привлечения дефектоскопистов (специалистов по магнитному НК) обслуживает дефектоскоп и проводит диагностирование канатов. При работе на панели блока управления и идентификации (БУИ) дефектоскопа загораются сигналы «светофора». Зеленый сигнал означает работоспособное состояние каната; желтый — ограниченно работоспособное, требующее повышенного внимания; красный — неработоспособное. Автоматизация процесса диагностирования путем передачи части функций дефектоскописта аппаратуре НК имеет большое значение для повышения эффективности работ. За счет исключения субъективного фактора при расшифровке дефектограмм, идентификации дефектов и определении их параметров человеком повышается достоверность результатов диагностирования. В последние два–три года в ЦВКС модернизированы системы отсоса неорганизованных выбросов горячих потоков воздуха в конвертерной зоне, что позволило снизить вероятность нагрева грузовых канатов при заливке чугуна до опасно высоких температур: 250–300 °С. С октября 2017 г. на заливочных кранах ЦВКС вместо шестипрядных канатов диаметром 42 мм, изготавливаемых по ТУ 14-4-273—2002 (конструкция 6x25(1+6; 6+12)+7x7(1+6), применяют канаты стандарта EN 12385-4—2000 (конструкция 6xK31(1+6+6/6+12)+7x7(1+6) того же диаметра с пластическим обжатием прядей и проволоками из стали марки 70KK (маркировочная группа 1770 Н/мм² по DIN 2078). Эти два обстоятельства повысили надежность работы канатов и открыли возможность продления их нормативного ресурса. В 2018–2019 гг. реализована программа исследований влияния циклических силовых и температурных воздействий на механические характеристики и несущую способность канатов стандарта EN 12385-4—2000.

Пирометрия и лабораторный анализ температурного воздействия на канаты

Измерения температуры канатов и узлов механизма главного подъема заливочных кранов, проведенные в период одной рабочей смены, показали следующее. Грузовые канаты во время спуска пустого ковша после заливки чугуна нагревались до 128–160 °С. Термограммы, полученные для одного из кранов, приведены на рис. 2. Максимальные температуры траверсы и цепей тепловой защиты были равны соответственно 193,5 и 222,6 °С; средняя температура чугуна (шлака) в ковше — 998,5 °С. Полученные данные послужили основанием для разработки и реализации программы исследований влияния термических воздействий на физико-механические характеристики материала проволоки и несущую способность канатов.



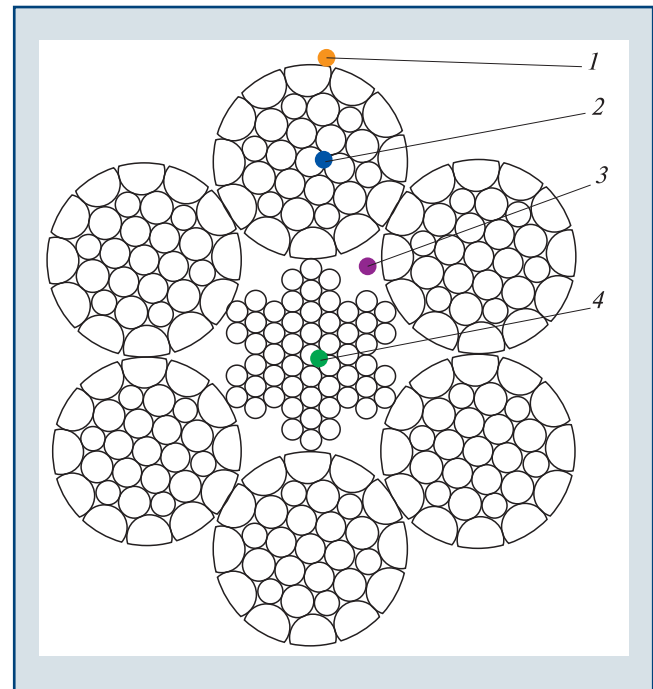
▲ Рис. 2. Термограммы грузовых канатов заливочного крана

▲ Fig. 2. Thermograms of the filling crane cargo ropes

Температурный градиент по сечению каната в начале заливки вызывает появление дополнительных термических напряжений в проволоках прядей и сердечника, отрицательно влияющих на несущую способность (прочность) каната. Оценка температурных напряжений с учетом снижения прочностных характеристик проволоки при термоциклировании позволяет выявить возможный характер разрушения структуры каната и сформулировать условия прочно-

сти каната в горячем состоянии [9]. В лабораторных условиях исследовано распределение температуры по сечению каната при кратковременном нагреве, имитирующем термическое воздействие в процессе заливки чугуна из ковша в конвертер.

На рис. 3 показано расположение термопар в поперечном сечении на середине длины образца каната длиной 35 см (здесь 1–4 — термопары). Цветовое обозначение термопары соответствует цвету линии, отображающей на термограммах измеренные значения температуры, зафиксированные данной термопарой.

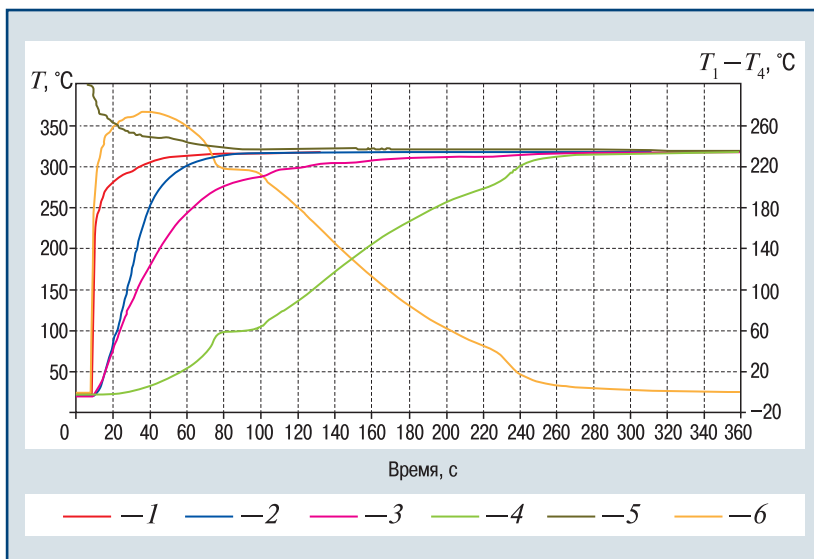


▲ Рис. 3. Размещение термопар в сечении каната стандарта EN 12385-4–2000

▲ Fig. 3. Placement of thermocouples in the cross section of the rope of standard EN 12385-4–2000

На рис. 4 приведены результаты эксперимента при опускании образцов в тигель с расплавленным свинцом (начальная точка плавления — $T = 327\text{ °C}$). Кривые 1–4 соответствуют температурам, измеряемым термопарами соответственно № 1–4; кривая 5 — температура среды (расплавленный свинец); кривая 6 — разность температур $T_1 - T_4$, °С, измеряемых термопарами № 1 и 4. Масштаб разности температур $T_1 - T_4$ виден на правой шкале.

Значительный температурный градиент $T_1 - T_4$ (кривая 6) держится на протяжении примерно 3 мин, что соответствует средней продолжительности температурного воздействия на канат в начальной стадии заливки чугуна. Разница температур наружных и внутренних проволок сердечника может достигать нескольких сотен градусов, что приводит к появлению температурных напряжений 500–600 МПа [13]. При температуре около 300 °С прочность по напряжениям «горячего» каната в целом снижается



▲ Рис. 4. Изменение температуры по сечению образца каната стандарта EN 12385-4—2000 при погружении в расплавленный свинец
 ▲ Fig. 4. Change in temperature over the cross-section of the rope sample of standard EN 12385-4-2000 when immersed in the molten lead

примерно на 25 % по сравнению с прочностью «холодного» (остывшего) каната [14, 15]. Заметим, что в производственных условиях измерение температуры поверхности грузовых канатов тепловизионными средствами с приемлемой точностью (10–20 °С) возможно лишь в условиях отсутствия факела пламени над конвертером и существенных неоднородностей поля температур вблизи канатов.

Для оценки влияния высокотемпературного нагрева и термоциклирования на микроструктуру, микротвердость и механические свойства материала проволок каната стандарта EN 12385-4—2000 выполнен комплекс металлографических исследований [14]. Эксперименты проводились с использованием двух образцов: отрезка каната в исходном состоянии и каната после демонтажа с крана с наработкой $N = 1189$ заливок. Первый образец каната отрезали перед навеской на кран от той же бухты, второй — вырезали из наиболее поврежденного участка демонтированного каната с максимальной величиной ПС = 3 %. Результаты эксперимента по определению микротвердости ($HV_{0,1}$) свидетельствуют о том, что у каната после эксплуатации на кране снижается микротвердость металла проволок наружных прядей. Основная задача состояла в выявлении температурного интервала синеломкости стали марки 70КК и количественной оценке повышения предела

прочности и снижения пластичности. Испытания на разрыв в горячем состоянии проводили на проволоках диаметром 1,65 мм, отобранных из наружной пряди каната. Установлено, что при температуре нагрева $T = 240$ °С эффект синеломкости стали марки 70КК проявляется в наибольшей мере.

Результаты разрывных испытаний образцов отработавших канатов

Действующим в ПАО «Северсталь» внутренним Регламентом определены два критерия, по которым эти канаты должны быть сняты с эксплуатации на основании данных диагностирования ТС с использованием магнитного дефектоскопа «ИНТРОС». Первое условие — превышение сигналом по каналу ПС нормативного значения (ПС* = 6 %). Второе — достижение предельной наработки ($N^* = 1200$ заливок чугуна в конвертер).

Возникает вопрос, какова при достижении этих норм браковки остаточная несущая способность каната, который эксплуатировали в условиях ЦВКС при значительных циклических термомеханических нагрузках? В целях получения ответа на этот вопрос проведены разрывные испытания образцов канатов стандарта EN 12385-4—2000, демонтированных с кранов в соответствии с требованиями Регламента.

В лаборатории ООО «Северсталь подъемные технологии» на разрывной машине выполнены испытания на агрегатную прочность образцов, вырезанных из наиболее нагруженных и поврежденных участков канатов, которые эксплуатировались в ЦВКС на кранах № 8, 10 и были демонтированы после достижения наработок, близких к $N^* = 1200$ заливок. Результаты разрывных испытаний на агрегатную прочность образцов № 1 и 2 приведены в табл. 1. Анализ данных свидетельствует о том, что демонтированные канаты обладали достаточным коэффициентом запаса прочности по отношению к номинальному натяжению каната при весе полного ковша более 740 кН.

Результаты определения суммарных разрывных усилий (согласно ГОСТ 3241—97) по проволокам образцов, которые вырезались из демонтированных канатов с наработкой, близкой к предельной, при-

Таблица 1

Номер образца	Номер каната	Номер крана	ПС, %	Минимальное расчетное разрывное усилие по сертификату каната, кН	Фактическое разрывное усилие каната после эксплуатации, кН	Изменение по отношению к минимальному разрывному усилию по сертификату каната, %	Кoeffициент запаса прочности
1	1358018000	8	3	1245	1306,04	4,9	7,50
2	1359219001	10	3	1245	1246,08	0,1	7,16

Таблица 2

Номер каната	Номер крана	Число заливок	ПС, %	Суммарное разрывное усилие проволок в канате, кН		Изменение по отношению к суммарной прочности проволок по сертификату, %	Коэффициент запаса прочности
				по сертификату	после эксплуатации		
1359218000	8	1200	2,5	1632,7	1635,90	1,30	7,80
			0,5		1679,49	2,87	8,01
1359219001	10	1200	3,0	1626,2	1498,60	-7,85	7,16
			0		1692,60	4,08	8,07
1360639000	10	1168	3,0	1622,0	1523,81	-6,05	7,27
			1,1		1586,62	-2,18	7,57
1362433000	8	1200	2,5	1619,4	1699,65	4,96	8,11
			1,5		1652,07	2,02	7,88
1363957000	8a	1190	3,0	1638,3	1685,76	2,90	8,04
			0,4		1631,16	-0,44	7,78
1362433001	№ 8	863	2,3	1617,8	1635,75	1,11	7,80
			1,5		1673,15	3,42	7,98
			0,5		1647,50	1,83	7,86
1363957001	10	1065	2,5	1645,3	1702,36	3,47	8,12
			1,5		1712,21	4,07	8,17
			0,5		1619,08	-1,59	7,72
1362574001	8a	1157	2,5	1632,9	1705,51	4,45	8,14
			0,7		1665,51	2,00	7,94

введены в табл. 2. Коэффициент запаса прочности определялся для разрывных усилий «в целом», которые меньше на 17 % суммарного разрывного усилия проволок за счет винтовой конструкции каната [16].

Анализ показал, что у выбракованных канатов наблюдается как уменьшение, так и увеличение суммарного разрывного усилия проволок. Так, например, среднее значение изменения прочности канатов с наработкой, близкой к нормативной ($N^* = 1200$ заливок), и диагностическим показателем ПС = 3 % составляет минус 3,67 %. Помимо естественного разброса результатов испытаний, изменение прочности проволок отработавших канатов объясняется рядом дополнительных факторов. Прежде всего это влияние термомеханических воздействий, испытываемых канатами, на свойства и механические характеристики стали марки 70КК. Кроме того, следует иметь в виду, что температура наружных проволок канатов в процессе заливки чугуна контролируется лишь эпизодически. Поэтому неизвестно, до каких температур нагревались наиболее изношенные участки грузовых канатов, из которых вырезали образцы для разрывных испытаний. К тому же при определенных температурах нагрева у проволок каната из углеродистой стали наблюдается явление синеломкости, которое выражается в повышении твердости и снижении пластичности материала, что весьма опасно при циклическом изменении нагрузки [14].

По результатам выполненных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Температуру наружных проволок желательно непрерывно измерять в течение нескольких технологических циклов заливки чугуна в конвертер.

2. Грузовые канаты, демонтированные в соответствии с требованиями Регламента, имели коэффициенты запаса как по агрегатной прочности, так и по прочности проволок «в целом» больше, чем минимальный «коэффициент использования канатов» для механизмов группы классификации М7, равный 7,1 [1]. Данный факт свидетельствует о том, что предельные значения диагностического параметра ПС* = 6 % и нормативной наработки $N^* = 1200$ заливок могут быть пересмотрены в сторону их увеличения.

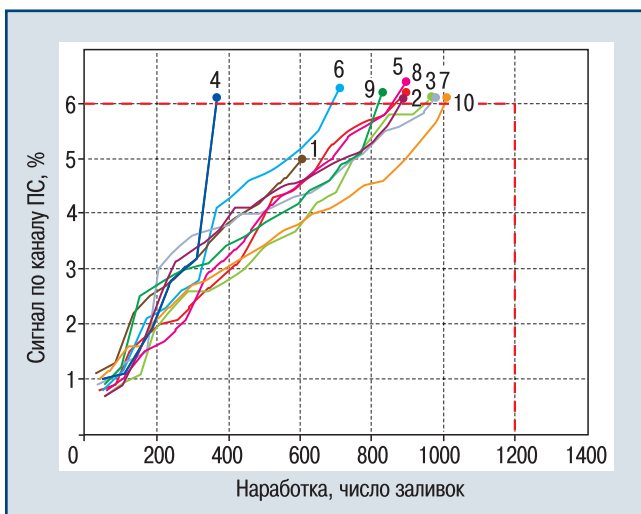
Анализ работоспособности канатов по результатам диагностирования

Под работоспособностью каната понимается состояние, при котором значения параметров, характеризующих его способность выдерживать заданные термомеханические нагрузки, соответствуют требованиям нормативно-технической документации. Для канатов заливочных кранов такими параметрами являются максимальное рабочее натяжение, температура среды в процессе заливки, наработка и диагностический показатель износа — значение ПС. Нарботка определяется числом заливок чугуна в конвертер (числом плавов). С точки зрения температурного воздействия на канат наработку также естественно измерять числом термоциклов.

Индивидуальным ресурсом конкретного каната является наработка с момента навески до замены по достижении предельного значения N^* или, согласно нормам браковки, по эксплуатационным дефектам. Обобщенным показателем ТС эксплуатируемого каната как механической конструкции служит коэффициент запаса прочности по нагрузке в «горячем» состоянии. В работе [9] предложена методика

расчетной оценки остаточной прочности канатов заливочных кранов по данным магнитной дефектоскопии с учетом влияния перечисленных выше термомеханических факторов.

Сравним влияние эксплуатационных режимов на работоспособность грузовых канатов, которые изготовлены по ТУ 14-4-273—2002 и стандарту EN 12385-4—2000. В качестве исходного материала для статистической обработки данных дефектоскопии используем так называемые таблицы стойкости — зависимости сигналов дефектоскопов «ИНТРОС» и «ИНТРОС-АВТО» по каналам ПС от наработки каната. В качестве примера на рис. 5 приведены результаты мониторинга ТС грузовых канатов ТУ 14-4-273—2002 одного из кранов (№ 10), полученные в период с декабря 2015 г. по декабрь 2016 г. до внедрения системы управления отсосом выбросов горячих потоков воздуха над конвертерами. Красные пунктирные линии ограничивают область работоспособных состояний канатов — $N^* = 1200$ заливок, $ПС^* = 6\%$. Нумерация кривых здесь и далее соответствует последовательной замене канатов вследствие отбраковки. Если не учитывать несколько выпадающих точек (редкие события), общим признаком браковки всех канатов является выход диагностического показателя ПС за предельный уровень $ПС^* = 6\%$ до достижения регламентируемого значения наработки $N^* = 1200$ заливок. Очевидно, причиной преждевременной замены канатов послужило интенсивное термическое воздействие при заливке чугуна, которое, наряду с термомеханическими напряжениями в проволоках, приводило к постепенному изменению начальной структуры металла, т.е. вызывало так называемый пережог каната.

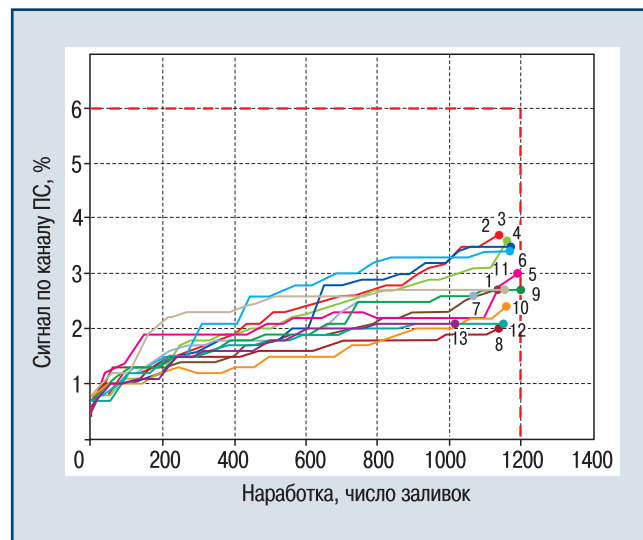


▲ Рис. 5. Зависимости сигнала по каналу ПС от наработки
▲ Fig. 5. Dependence of the signal on the Loss of Metallic Area channel on the operating time

В 2017 г. за счет принятия мер по снижению интенсивности температурного воздействия в процессе

заливки работоспособность используемых канатов, изготовленных по ТУ 14-4-273—2002, заметно повысилась. При наработках на всех трех кранах, близких к 1200 заливкам, лишь у двух демонтированных канатов максимальный показатель ПС был близок к предельному значению $ПС^* = 6\%$, остальные 16 канатов заменены со средними показателями $ПС = (4-4,6)\%$.

На рис. 6 показаны диагностические зависимости канатов новой конструкции EN 12385-4—2000, проработавших на кране № 10 с октября 2017 г. по октябрь 2019 г. в щадящих температурных условиях. Численные оценки показателей работоспособности канатов в период 2017—2019 гг. для трех кранов приведены в табл. 3. Все канаты сняты с эксплуатации вблизи планового показателя 1200 плавков со средними значениями ресурса 1136 (кран № 8), 1146 (кран № 8а) и 1142 (кран № 10) заливок. При этом средние значения ПС оказались меньше, чем аналогичные средние для канатов ТУ 14-4-273—2002 при близких выборках. К тому же распределения показателя ПС на канатах EN 12385-4—2000 всех кранов являются более компактными по сравнению с соответствующими распределениями у канатов ТУ 14-4-273—2002. Таким образом, канаты EN 12385-4—2000 имеют более стабильные термомеханические характеристики в сходных эксплуатационных условиях, а значит, открывается объективная возможность продления их ресурса по отношению к предельно допустимому значению ПС, равному 6% или даже несколько большему.



▲ Рис. 6. Зависимости сигнала по каналу ПС от наработки (щадящие температурные условия)
▲ Fig. 6. Dependence of the signal on Loss of Metallic Area channel on the operating time (gentle temperature conditions)

Расчет показателей риска

Наиболее частая причина демонтажа грузовых канатов на разных кранах — достижение наработкой значения, близкого к установленному Регламентом $N^* = 1200$ заливок. Измеренное значение ПС при замене

Таблица 3

Параметры наработки	Кран № 8	Кран № 8а	Кран № 10
	Период диагностирования		
	21.10.2017–16.11.2019	20.09.2017–28.10.2019	18.10.2017–20.10.2019
Число замен канатов (объем выборки)	17	18	13
Индивидуальный ресурс (число заливок):			
максимальный	1200	1200	1200
минимальный	936	1097	1017
средний	1136	1146	1142
стандартное отклонение	62	28	49
Потеря сечения при замене каната, %			
максимальная	4,50	4,00	3,70
минимальная	2,00	2,00	2,00
средняя	3,28	3,19	2,81
стандартное отклонение	0,64	0,71	0,59

каната является случайной величиной. За показатель риска аварийного ТС каната можно принять статистическую вероятность случайного события, которое заключается в выходе диагностического показателя ПС за браковочный уровень $ПС^* = 6\%$ при наработке $N^* = 1200$ заливок (термоциклов). Гистограмма измеренных значений ПС при заменах канатов на трех кранах и ее аппроксимации нормальным и логарифмически нормальным законами распределения приведены на рис. 7 (здесь 1 — нормальное распределение; 2 — логарифмически нормальное распределение). Логарифмически нормальное распределение присуще ресурсу объектов по числу циклов нагружения до разрушения [17, 18]. По сути, это близко к характеру работы канатов заливочных кранов при периодических силовых и температурных воздействиях.



▲ Рис. 7. Гистограмма диагностического параметра ПС при заменах канатов и ее аппроксимации
 ▲ Fig. 7. Histogram of the Loss of Metallic Area diagnostic parameter when replacing the ropes and its approximation

Функция безопасности $S(N)$ вводится как вероятность $P\{A\}$ случайного события А, состоящего в том, что при $N = N^*$ ни разу не возникнет «аварийная» ситуация (отказ — превышение диагностическим параметром ПС порогового значения), т.е.

$$S(N^*) = P\{ПС(N^*) \leq ПС^* = 6\% \}.$$

Тогда функция $Q(N^*) = 1 - S(N^*)$ определяет искомую вероятность (риск) превышения допустимого норматива ПС* по достижении наработки N^* . В данном случае получены следующие оценки:

в предположении нормального распределения:

$$P\{1 < ПС \leq ПС^*\} = 0,999199;$$

$$Q(N^*) = P\{ПС > ПС^*\} = 8,01144 \cdot 10^{-4};$$

в предположении логарифмически нормального распределения:

$$P\{1 < ПС \leq ПС^*\} = 0,998673;$$

$$Q(N^*) = P\{ПС > ПС^*\} = 13,2697 \cdot 10^{-4}.$$

При мониторинге грузовых канатов с применением дефектоскопа «ИНТРОС-АВТО», когда контрольными показателями диагностирования являются сигналы на дисплее БУИ (желтый, соответствующий ПС = 4 %, и красный — ПС = 5 %), в качестве случайной величины следует рассматривать наработку N при наступлении одного из этих двух событий. Тогда за два показателя риска принимаются статистические вероятности случайных событий, которые заключаются в выходе значения наработки N за допустимый уровень $N^* = 1200$ заливок при ПС = 4 % и (или) ПС = 5 %:

$$Q_1(N^*) = P\{N > N^*, ПС > 4\% \},$$

$$Q_2(N^*) = P\{N > N^*, ПС > 5\% \}.$$

Для определения оценок Q_1 и (или) Q_2 необходимо накопить статистический материал, который позволит построить гистограммы наработок N при наступлении соответствующих событий.

Обоснование и рекомендации по продлению ресурса грузовых канатов заливочных кранов

Приведенные выше результаты открывают возможность постановки вопроса о продлении ресурса канатов стандарта EN 12385-4—2000 на заливочных кранах ЦВКС. Почти все канаты в рассмотренные календарные периоды эксплуатации были демонтированы при наработках, близких к регламентированной $N^* = 1200$ заливок. При этом диагностированные показатели ПС оказались почти вдвое меньше предельно допустимого значения $ПС^* = 6\%$ с ничтожно малыми рисками выхода за этот предел. Очевидно, такое положение вещей является экономически невыгодным. Это обстоятельство дает основание утверждать, что срок службы (ресурс) грузовых канатов каждого крана может быть продлен относительно регламентированного значения наработки $N^* = 1200$ заливок.

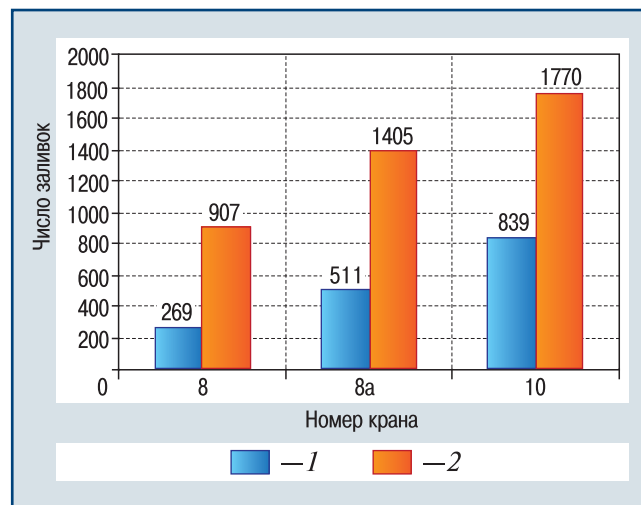
Обозначим через $\langle ПС \rangle$ — среднее значение основного диагностируемого параметра ПС при заменах отработавших канатов; $V_{ПС}$ — скорость изменения ПС к моменту замены канатов в условных единицах, которые означают отношение ПС (в процентах) к наработке N (числу заливок). В первом приближении дополнительный ресурс R эксплуатируемого каната можно оценить линейным прогнозом:

$$R = (ПС^* - \langle ПС \rangle) / V_{ПС}$$

В зависимости от значения параметра $V_{ПС}$ перед демонтажем отработавшего каната могут быть получены два решения. Консервативные оценки дополнительного ресурса R соответствуют максимальной скорости ПС, определяемой по имеющейся выборке из таблиц стойкости. Рискованные оценки параметра R соответствуют средней скорости ПС по данной выборке.

Прогнозируемые значения дополнительного ресурса при нормативном значении $ПС^* = 6\%$ представлены диаграммами на рис. 8 (здесь 1 — консервативный прогноз; 2 — рискованный прогноз).

На основании полученных оценок напрашивается вывод, что при $ПС^* = 6\%$ безопасное продление ресурса канатов сверх нормативного значения $N^* = 1200$ находится в диапазоне $R = 300-400$ заливок. В случае принятия решения о предельном значении $ПС^* = 7\%$ и при соблюдении существующей технологии заливки чугуна в конвертер ресурс грузовых канатов может быть продлен на $R = 400-500$ заливок. Более достоверные прогнозы (консервативный и рискованный) дополнительного ресурса возможны, если при заменах канатов будет иметь место относительно малый разброс соответствующих значений диагностируемого параметра ПС. В этом вопросе важен регламент диагностирования каната, в особенности при больших наработках. Опираясь



▲ Рис. 8. Возможный дополнительный ресурс канатов при условии, что скорость ПС оценивается по трем последним инспекциям

▲ Fig. 8. Possible additional service life of the ropes, provided that the speed of the Loss of Metallic Area is estimated by the last three inspections

на данные мониторинга, можно рекомендовать на начальном этапе эксплуатации каната (первые 300 заливок) проводить инспекцию с периодичностью $\Delta N = 30-40$ заливок, а далее (до $N^* = 1200$) — с периодичностью $\Delta N \approx 50-60$ заливок. Если же принимается решение о продлении ресурса до $N^* = 1500$, то интервал проведения дефектоскопии должен быть уменьшен до $\Delta N = 30-40$ заливок. При проявлении признаков ускоренной деградации ПС, а именно двух последовательных приращений $\Delta ПС > 1\%$, диагностирование каната следует проводить не реже, чем через $\Delta N = 20$ заливок. В случае зафиксированного «высокотемпературного нагрева» каната (температура наружных проволок внешних прядей превышает $200\text{ }^\circ\text{C}$) ресурс каната устанавливается с учетом предельного значения основного диагностического параметра $ПС^* = 6\%$ и не должен превышать $N^* = 1200$ заливок. В случае «перегрева» (температура наружных проволок каната превышает $250\text{ }^\circ\text{C}$) канат должен быть немедленно заменен.

Заключение

Грузовые канаты механизма главного подъема заливочных кранов в конвертерном цехе ПАО «Северсталь» подвергаются периодическим силовым нагрузкам и высокотемпературным воздействиям. Подобные условия работы весьма рискованны для канатов как несущих механических конструкций. Мониторинг технического состояния грузовых канатов с использованием инструментальных средств магнитного неразрушающего контроля, в том числе и автоматизированных дефектоскопов, играет важную роль в обеспечении безопасной работы талевой канатной системы заливочного крана.

Выполненный анализ показал, что развитие дефектов типа «потеря металлического сечения» по причине коррозионного, абразивного и фрикцион-

ного износа канатов сопровождается деградацией механических характеристик стали под влиянием интенсивных термоциклических воздействий. Эти обстоятельства необходимо учитывать при контроле температуры окружающей среды в зоне конвертера в процессе заливки чугуна, а также при назначении предельной наработки каната и допустимых значений диагностических параметров.

В дополнение к нормативной базе критериев браковки канатов механизма главного подъема заливочного крана предлагается ряд ограничений на эксплуатацию канатов, изготовленных по стандарту EN 12385-4—2000, диаметром D , равным 42 мм. Канат немедленно выводят из эксплуатации при обнаружении в процессе диагностирования хотя бы одного из следующих дефектов (повреждений): потери сечения, обусловленной термомеханическим воздействием, равной 7 % и более; обрыва пряди или металлического сердечника каната; наличия 5 обрывов на длине $6D = 252$ мм; наличия 10 обрывов на длине $30D = 1260$ мм; наличия 40 обрывов на длине $500D = 21\,000$ мм.

Эксплуатация каната также не допускается, если имеет место перекос траверсы крана, определяемый визуально, или наружные проволоки каната нагреваются до температуры 250 °С и выше.

Накапливаемые данные мониторинга и соответствующие вероятностные показатели могут служить основанием для корректировки регламента контроля технического состояния грузовых канатов заливочных кранов и обоснованного продления их нормативного ресурса при условии соблюдения допустимого температурного режима заливки чугуна.

Список литературы

1. *Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности.* — 2-е изд., испр. и доп. — Сер. 10. — Вып. 81. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2020. — 164 с.
2. *РД 10-231—98.* Стропы грузовые общего назначения. Требования к устройству и безопасной эксплуатации. URL: [https://www.snip-info.ru/Rd_10_-33-93_\(s_izm_-_rd_10-231-98\).htm](https://www.snip-info.ru/Rd_10_-33-93_(s_izm_-_rd_10-231-98).htm) (дата обращения: 20.01.2020).
3. *ISO 4309:2017(E).* Cranes — Wire ropes — Care and maintenance, installation, examination and discard. URL: <https://www.sis.se/api/document/preview/922803/> (дата обращения: 20.01.2020).
4. *Bridon.* Crane Rope Catalogue. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/11749086/crane-rope-catalogue-bridon> (дата обращения: 20.01.2020).
5. *Hot Metal Cranes: What is Required?* URL: http://www.naicranes.com/engineering/technical_reports/hotmetal.pdf (дата обращения: 20.01.2020).
6. *Влияние термоциклических нагрузок на прочность каната литейных кранов/* В.П. Малов, А.Л. Кузьминов, В.Г. Попов и др.// *Безопасность труда в промышленности.* — 1999. — № 11. — С. 30—32.

7. *Котельников В.С., Сухоруков В.В.* Дефектоскопия стальных канатов грузоподъемных кранов, подверженных тепловому воздействию// *Безопасность труда в промышленности.* — 2003. — № 8. — С. 19—21.

8. *Sukhorukov V.* Steel ropes NDT of cranes of metallurgical works// *International Journal of Transport & Logistics.* — 2007. — Vol. 7. — P. 45—50.

9. *Сухоруков В.В., Воронцов А.Н., Волоховский В.Ю.* Контроль износа канатов заливочных кранов металлургических предприятий// *Черные металлы.* — 2013. — № 10 (982). — С. 56—60.

10. *Vorontsov A., Volokhovskiy V., Sukhorukov V.* Hot metal Crane Ropes: Magnetic NDT, Capacity Simulation, Strength Safety, Temperature Criterion// *Proceedings of OIPEEC Conference.* — Oxford, 2013. — P. 33—42.

11. *Slesarev D., Sukhorukov D., Shpakov I.* Automated magnetic rope condition monitoring: concept and practical experience// *Proceedings of the OIPEEC Conference.* — La Rochelle, 2017. — P. 295—300.

12. *Сухоруков В.В., Котельников В.С.* Мониторинг состояния стальных канатов автоматизированными средствами технического диагностирования// *Безопасность труда в промышленности.* — 2019. — № 9. — С. 72—81. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-72-81

13. *Оценка несущей способности канатов заливочных кранов на основании данных лабораторных термических испытаний/* А.Н. Воронцов, В.Ю. Волоховский, В.И. Мирошниченко и др.// *Вестник Московского энергетического института.* — 2018. — № 6. — С. 12—18.

14. *Влияние нагрева и термоциклирования на механические свойства канатной проволоки из углеродистой стали/* В.М. Матюнин, А.Ю. Марченков, П.В. Волков и др.// *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* — 2019. — Т. 85. — № 12. — С. 58—64.

15. *Chen Yu., Young B., Uy B.* Behavior of High Strength Structural Steel of Elevated Temperatures// *Journal of Structural Engineering.* — 2006. — Vol. 132. — № 12. — P. 1948—1954.

16. *Малиновский В.А.* Стальные канаты: аналитический справочник. — Одесса: Астропринт, 2016. — 252 с.

17. *Брайде В.И., Семенов Л.Н.* Надежность подъемно-транспортных машин. — Л.: Машиностроение, 1986. — 183 с.

18. *Bolotin V.V.* Mechanics of Fatigue. Mechanical Engineering Series. — Boca Raton: CRC Press, 1999. — 465 p.

vvolokhovskiy@intron.ru

Материал поступил в редакцию 27 января 2020 г.

«**Bezopasnost Truda v Promyshlennosti**»/ «**Occupational Safety in Industry**», 2020, № 5, pp. 7—16.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-7-16

Analysis of the Operational Reliability of the Hot-Metal Crane Cargo Ropes in Steelmaking

V.Yu. Volokhovskiy, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Group Leader, vvolokhovskiy@intron.ru

A.N. Vorontsov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Lead Specialist

I.I. Shpakov, Group Leader

INTRON PLUS, Ltd., Moscow, Russia
V.V. Goncharov, Head of Diagnostics Service
PAO Severstal, Cherepovets, Russia

Abstract

When performing technological operations of casting the cast iron into the converter, the steel ropes of bridge casting cranes in steel-making workshops are subjected to cyclic power and high-intensity thermal loading. These operational factors lead to a decrease in the load-bearing capacity of the cargo ropes. Corrosion and abrasive wear of the ropes is accompanied by the change in the mechanical characteristics of the wires metal as a result of thermal cycling. Therefore, monitoring the current technical condition of cargo ropes is of great importance for ensuring filling cranes safe operation. Therefore, monitoring the current technical condition of cargo ropes is of great importance for ensuring hot-metal cranes safe operation. The article reflects the results of laboratory experiments and field tests concerning the study of the operating factors influence on the performance of the ropes of the hot-metal cranes of the converter steelmaking shop at PAO Severstal. Recommendations are given on the organization of monitoring, correction of the limit value of the allowable loss of cross-section for metal and the extension of the standard service life of cargo ropes of the mechanisms of the main lifting for filling cranes.

Key words: hot-metal cranes, steel ropes, magnetic flaw-detection, control instructions, operating defect, normative lifetime.

References

1. Safety rules for hazardous production facilities where lifting devices are used: Federal rules and regulations in the field of industrial safety. 2-e izd., ispr. i dop. Ser. 10. Iss. 81. Moscow: ZAO NTTs PB, 2020. 164 p. (In Russ.).
2. RD 10-231-98. General-purpose cargo slings. Requirements for the device and safe operation. Available at: [https://www.snip-info.ru/Rd_10-33-93_\(s_izm_-_rd_10-231-98\).htm](https://www.snip-info.ru/Rd_10-33-93_(s_izm_-_rd_10-231-98).htm) (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).
3. ISO 4309:2017(E). Cranes — Wire ropes — Care and maintenance, installation, examination and discard. Available at: <https://www.sis.se/api/document/preview/922803/> (accessed: January 20, 2020).
4. Bridon. Crane Rope Catalogue. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/read/11749086/crane-rope-catalogue-bridon> (accessed: January 20, 2020).
5. Hot Metal Cranes: What is Required? Available at: http://www.naicranes.com/engineering/technical_reports/hotmetal.pdf (accessed: January 20, 2020).
6. Malov V.P., Kuzminov A.L., Popov V.G., Tebnev S.A., Lipatov A.S. Influence of thermocyclic loads on the rope

strength of the foundry cranes. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 1999. № 11. pp. 30–32. (In Russ.).

7. Kotelnikov V.S., Sukhorukov V.V. Flaw detection of steel ropes of lifting cranes exposed to heat effect. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2003. № 8. pp. 19–21. (In Russ.).

8. Sukhorukov V. Steel ropes NDT of cranes of metallurgical works. *International Journal of Transport & Logistics*. 2007. Vol. 7. pp. 45–50.

9. Sukhorukov V.V., Vorontsov A.N., Volokhovskiy V.Yu. Control of wear of hot-metal crane ropes of the metallurgical enterprises. *Chernye metally = Ferrous metals*. 2013. № 10 (982). pp. 56–60. (In Russ.).

10. Vorontsov A., Volokhovskiy V., Sukhorukov V. Hot metal Crane Ropes: Magnetic NDT, Capacity Simulation, Strength Safety, Temperature Criterion. *Proceedings of OIPEEC Conference*. Oxford, 2013. pp. 33–42.

11. Slesarev D., Sukhorukov D., Shpakov I. Automated magnetic rope condition monitoring: concept and practical experience. *Proceedings of the OIPEEC Conference*. La Rochelle, 2017. pp. 295–300.

12. Sukhorukov V.V., Kotelnikov V.S. Monitoring of Steel Ropes Condition with Technical Diagnostics Automated Means. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2019. № 9. pp. 72–81. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-72-81

13. Vorontsov A.N., Volokhovskiy V.Yu., Miroshnichenko V.I., Gayduchenko V.V., Ustinov A.V. Assessment of bearing capacity of the hot-metal crane ropes based on the laboratory thermal tests. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Vestnik MEI*. 2018. № 6. pp. 12–18. (In Russ.).

14. Matyunin V.M., Marchenkov A.Yu., Volkov P.V., Volokhovskiy V.Yu., Vorontsov A.N., Goncharov V.V. Effect of heating and thermal cycling on the mechanical properties of carbon steel wire rope. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2019. Vol. 85. № 12. pp. 58–64. (In Russ.).

15. Chen Yu., Young B., Uy B. Behavior of High Strength Structural Steel of Elevated Temperatures. *Journal of Structural Engineering*. 2006. Vol. 132. № 12. pp. 1948–1954.

16. Malinovskiy V.A. Steel ropes: Analytical guide. Odessa: Astroprint, 2016. 252 p. (In Russ.).

17. Braude V.I., Semenov L.N. Reliability of hoisting machines. Leningrad: Mashinostroenie, 1986. 183 p. (In Russ.).

18. Bolotin V.V. Mechanics of Fatigue. *Mechanical Engineering Series*. Boca Raton: CRC Press, 1999. 465 p.

Received January 27, 2020

ПАМЯТКА АВТОРУ

С авторов научно-технических статей, включая аспирантов, за публикацию их рукописей плата не взимается. Вознаграждение авторам не выплачивается. Электронная версия журнала с опубликованной статьей высылается каждому автору на его электронную почту.