

УДК 620.179.1:677.72

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-12-18

## Оценка несущей способности канатов заливочных кранов на основании данных лабораторных термических испытаний

А.Н. Воронцов, В.Ю. Волоховский, В.И. Мирошниченко, В.В. Гайдученко, А.В. Устинов

Представлен подход к оценке несущей способности стальных канатов заливочных кранов металлургических предприятий с использованием данных лабораторных термических испытаний, проводимых по двум направлениям.

Для первого характерен анализ изменения температуры по сечению каната при термоциклировании контактным способом с использованием термопар и дистанционным методом при помощи тепловизора. Предложены рекомендации относительно методики измерения температуры каната в естественных условиях производственного цикла.

Во втором случае исследовано изменение температуры по сечению каната при кратковременном нагреве, имитирующем воздействие выброса пламени из ковша при заливке чугуна в конвертер. Установлено, что разница температур проволок сердечника и наружных проволок внешних прядей может достигать нескольких сотен градусов. Показано, что для канатов с более плотной структурой тепловой обмен между проволоками улучшается, что приводит к более однородному распределению температуры по сечению.

Экспериментальная зависимость от времени температурного градиента использована для оценки напряжений в проволоках на основе двухкомпонентной стержневой схемы. Изменение запаса прочности рабочего каната при термоциклировании определено с учетом опытных данных о влиянии температуры на прочностные характеристики стали. Доказано, что реальный запас прочности «горячего» каната существенно меньше проектного сертифицированного запаса прочности в состоянии поставки. Проанализированы возможные варианты разрушения каната и сформулированы критерии прочности каната в горячем состоянии.

На основе расчетно-экспериментальных оценок предложена методика определения двухпараметрической области допустимых рабочих состояний каната, позволяющая заранее установить возможность или невозможность его безопасной эксплуатации при существующей технологии заливки чугуна в конвертер. Дано общее представление о рискованных режимах эксплуатации канатов заливочных кранов.

*Ключевые слова:* канат заливочного крана, температурное воздействие, оценка прочности, критерии технического состояния.

*Для цитирования:* Воронцов А.Н., Волоховский В.Ю., Мирошниченко В.И., Гайдученко В.В., Устинов А.В. Оценка несущей способности канатов заливочных кранов на основании данных лабораторных термических испытаний // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 12—18. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-12-18.

## Assessing the Bearing Capacity of Hot-Metal Crane Ropes Based on Laboratory Thermal Test Data

A.N. Vorontsov, V.Yu. Volokhovskiy, V.I. Miroshnichenko, V.V. Gaiduchenko, A.V. Ustinov

The article presents an approach to assessing the bearing capacity of the steel ropes of hot metal cranes used at metallurgical enterprises. The rope bearing capacity is assessed based on the data of laboratory thermal tests, which are carried out in two ways.

According to the first way, the temperature variation pattern over the rope cross-section is analyzed in subjecting the rope to thermal cycling by means of the contact method with the use of thermocouples and by means of remote measurements using an infrared imager. Recommendations regarding the procedure of carrying out rope temperature measurements under the production cycle field conditions are suggested.

The second way implies studying the temperature variation pattern over the rope cross section in subjecting it to a short-term heating, which simulates the burst of flame from the ladle in pouring cast iron into the converter. It has been determined that the temperatures of rope core wires and outer wires of external strands may differ from each other by as much as several hundred degrees. It has been shown that ropes having a denser structure are characterized by better heat transfer between the wires and, as a consequence, feature more uniform temperature distribution over the rope cross-section.

An experimental time dependence of the temperature gradient was used for estimating the stresses in wires based on a two-component rod-type analysis scheme. The change in the working rope safety margin under thermal cycling conditions was determined taking into account experimental data on the effect of temperature on the steel strength parameters. It has been shown that the real safety margin of a hot rope is essentially lower than its certified value in the rope delivery state. Possible rope failure cases are analyzed, and the hot rope strength criteria are formulated.

A procedure for determining the two-parametric region of the permissible rope operating states on the basis of combined numerical and experimental assessments has been proposed. The suggested procedure makes it possible to determine in advance whether or not safe operation of the rope is possible given the existing technology of pouring cast iron into the converter. A general concept of unsafe operating conditions of hot metal crane ropes is given.

*Key words:* hot metal crane rope, temperature effect, strength assessment, technical state criteria.

*For citation:* Vorontsov A.N., Volokhovskiy V.Yu., Miroshnichenko V.I., Gaiduchenko V.V., Ustinov A.V. Assessing the Bearing Capacity of Hot-Metal Crane Ropes Based on Laboratory Thermal Test Data. MPEI Vestnik. 2018;6:12—18. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-12-18.

## Введение

Грузовые литейные заливочные краны конвертерного производства работают в достаточно тяжелых условиях. Негативным фактором, влияющим на прочность крановых канатов, по праву считается воздействие на них высоких температур вследствие теплового излучения и выбросов пламени при заливке жидкого чугуна из ковша в конвертер (рис. 1). Высокотемпературные воздействия вызывают формирование в металле проволок отожженной структуры и значительное снижение микротвердости сорбитной составляющей, что существенно ухудшает механические свойства стали [1, 2]. Дополнительным отрицательным фактором является абразивный износ проволок.

Подобные условия работы весьма опасны для каната как для несущей механической конструкции. Поэтому их производители, руководствуясь нормативными документами [3, 4], рекомендуют не применять на грузовых кранах стальные проволочные канаты при рабочих температурах выше 450 °С. В противном случае возможны аварии механизма подъема, когда обрыв ветви каната приводит к падению траверсы с ковшом и разливу жидкого чугуна [5].

Оценка влияния температуры на несущую способность канатов в реальных условиях эксплуатации затруднена отсутствием достоверных данных о температурных полях в канате. Кроме того, отечественные и зарубежные нормативно-технические документы не содержат указаний о методиках учета изменения прочностных характеристик стальных проволок в зависимости от температуры.

Описано экспериментальное исследование распределения температуры по сечению стального каната заливочного крана при различных температурных воздействиях и представлена методика оценки несущей способности каната на основании полученных опытных данных.



Рис. 1. Заливка чугуна в конвертер на металлургическом заводе

## Моделирование температурных воздействий на стальной канат

Были поставлены две задачи. В рамках первой планировалось провести измерения распределения температуры по сечению каната при различных режимах термоциклирования контактным способом с использованием термопар и дистанционным методом при помощи пирометра (тепловизора). Сравнение полученных результатов проясняло обоснованный выбор значения коэффициента излучения и влияние таких факторов, как отсутствие или наличие в оптическом канале пирометра пламени, дыма, горящих частиц, а также зависимость измеренных значений температуры от угла, под которым происходит визирование пирометра. Подобная информация позволила бы подойти к решению проблемы измерения температуры каната в естественных условиях производственного цикла.

Вторая задача состояла в анализе изменения температуры по сечению каната при кратковременном нагреве, моделирующем термическое воздействие в процессе заливки чугуна. Температурный градиент вызывает появление значительных термических напряжений в проволоках прядей и сердечника, отрицательно влияющих на несущую способность (прочность) каната. Наряду с данными об изменении прочностных характеристик стальных проволок при термоциклировании оценочное знание температурных напряжений помогло выявить возможный характер разрушения каната и сформулировать критерии прочности каната в горячем состоянии.

Во всех опытах использовали образцы стального шестипрядного каната крестовой свивки с металлическим сердечником спецификации ТУ 14-4-273-2002 диаметром 42 мм. Проволоки прядей и сердечника выполнены из стали 70.

Термоциклирование в режиме нагрева–охлаждения образцов каната проводили с различными характеристиками циклов. Для нагрева образцов применяли программируемую муфельную электрическую печь ЮТ 210-10 объемом 10 литров и мощностью 2,9 кВт. Максимальная температура печи — 1000 °С. Температуру воздуха в печи измеряли кабельной термопарой, аналогичной тем, которые были смонтированы на канате.

Температуру образцов фиксировали кабельными хромель-алюмелевыми термоэлектрическими преобразователями тип КТХА 01.02. Рабочий спай не был изолирован от корпуса преобразователя. Холодные спаи помещали в термостат, температуру которого измеряли медным термометром сопротивления ТСМ 9203-06 (50 М ВЗ –50...+150 °С). Вводили поправку на температуру холодных спаев.

На рис. 2 изображена схема установки термопар в поперечном сечении на середине длины образца каната. Цветовое обозначение термопары соответствует цвету линии, отображающей на термограммах измеренные значения температуры, полученные данной

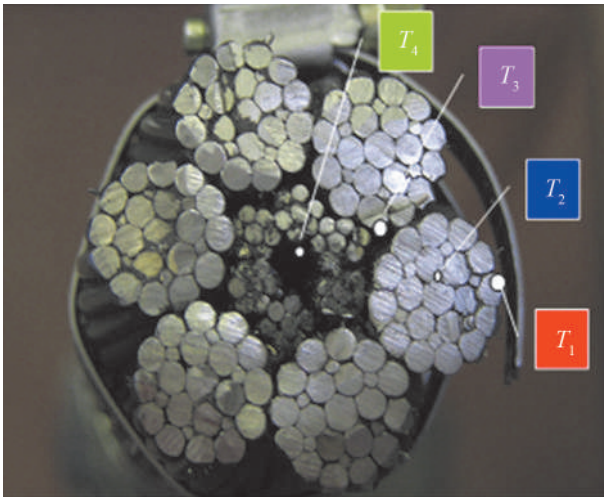


Рис. 2. Размещение термопар  $T_1$  —  $T_4$  в сечении каната

термопарой. Во всех случаях термопары, установленные в центре пряди, имели диаметр 0,5 мм, остальные — 1,0 мм.

Многофункциональная система измерений National Instruments USB-6289 была подключена к компьютеру для автоматизации измерений и архивирования информации. Для дистанционного измерения температуры в области термопары на поверхности каната использовали инфракрасный термограф ИРТИС-2000 СВ. Принцип его работы основан на сканировании температурного излучения оптикомеханическим сканером с одноэлементным высокочувствительным (не хуже 0,05 °С) ИК-приемником (InSb), охлаждаемым жидким азотом.

Пример измеренной температуры на протяжении нескольких циклов приведен на рис. 3. В этом опыте образец нагревали на разных режимах в печи и охлаждали в вертикальном положении на воздухе. По горизонтальной оси отложено время в формате часы:минуты:секунды.

На стадиях остывания термографом измеряли температуру поверхности каната в точке установки термопары № 1. Образец термограммы, полученной термографом, показан на рис. 4.

Показания термографа отличаются от показаний термопары. Для их совпадения при температурах до 300 °С необходимо установить на термографе коэффициент излучения примерно 0,7...0,8. При температурах от 300 до 500 °С показания термографа практически (с учетом погрешностей термографа и термопары) совпадают с данными термопары (при коэффициенте излучения 1,0). Следует отметить, что после многократных нагреваний каната в печи коэффициент излучения материала каната приблизился к значению 1,0, а разность показаний термопары № 1 и термографа уменьшилась.

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что с помощью термографа ИРТИС 2000 СВ при коррекции показаний с учетом коэффициента излучения можно с достаточной точностью измерять температуру поверхности нагретого каната в диапазоне температур от комнатных до 500 °С.

Во второй серии экспериментов исследовали изменение во времени температурного поля в сечении каната при кратковременном температурном воздействии. С этой целью образцы каната погружали в расплавленный свинец температурой около 330 °С, что близко к термическому воздействию на канат при заливке

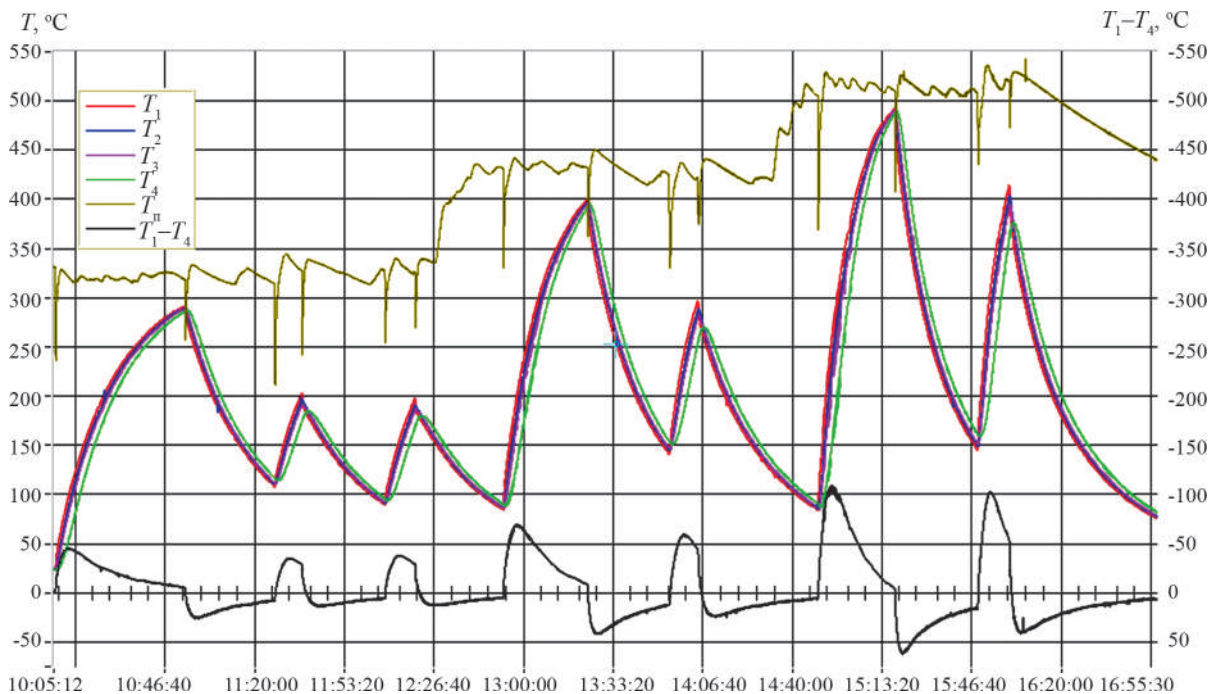


Рис. 3. Термоциклирование образца каната в муфельной печи



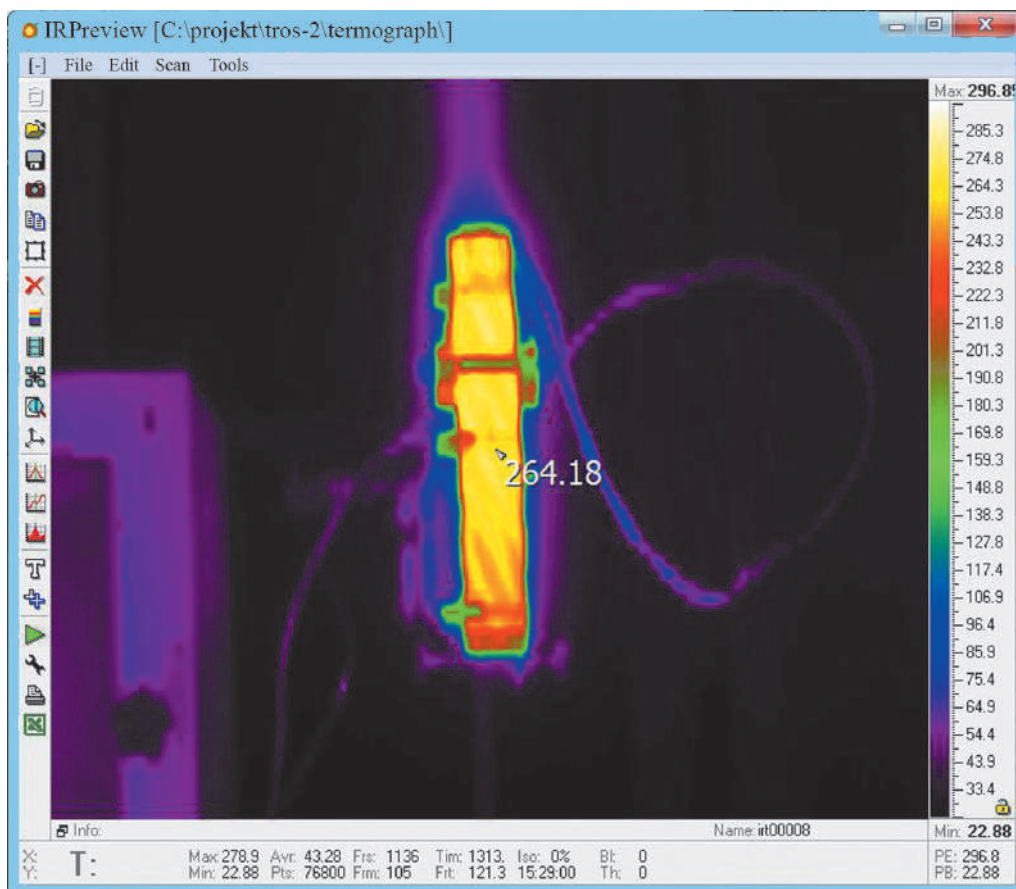


Рис. 4. Пример термограммы, получаемой термографом

чугуна в конвертер [2]. Тигель для плавления свинца изготовлен из стальной трубы диаметром 113/103 мм, длиной 370 мм, в которую помещали свинец и плавили с использованием газовых горелок. Температуру свинца измеряли той же термопарой, которую использовали для измерения температуры муфельной печи.

Результаты опыта по исследованию температурного поля в образце каната, имевшего комнатную температуру и практически мгновенно погруженного в расплавленный свинец, показаны на рис. 5. По левой вертикальной оси отложена температура, по правой оси — перепад температур по сечению (черная кривая), характеризующий изменение во времени градиента температурного поля. По горизонтальной оси указано время в формате часы:минуты:секунды. Температурный градиент держится на протяжении примерно 2 мин, что соответствует средней продолжительности высокотемпературного воздействия на канат в производственных условиях [5].

Результаты измерений показали, что:

- при нагреве и остывании канатов на воздухе наблюдается значительная неоднородность температурного поля по сечению каната. Разница температур между осью каната и его поверхностью при нагреве и остывании может достигать 200°, причем при переходе она меняет знак;
- при кратковременных воздействиях пламени на участок каната, когда температура поверхности быстро

возрастает, разница температур проволок сердечника и наружных проволок внешних прядей может составить несколько сотен градусов.

- средний темп охлаждения каната за 30 мин в естественных условиях на воздухе в вертикальном положении составляет примерно 5° в минуту при температуре каната 300 °С и примерно 10° в минуту при 500 °С.
- уменьшение теплового сопротивления между прядями каната, т. е. увеличение коэффициента теплопередачи за счет увеличения поверхности контакта прядей и уменьшения воздушных объемов между ними приводит к уменьшению разницы температур по сечению каната. Это означает, что канаты, имеющие профиль проволок и прядей, позволяющий свивать их более плотно, будут при нагреве и остывании обладать более однородной температурой.
- измерение температуры поверхности каната тепловизионными средствами с приемлемой на практике точностью 10...20 °С возможно в условиях отсутствия пламени и существенных неоднородностей поля температур вблизи каната.

#### Оценка несущей способности каната по данным термических испытаний

Проведенные измерения температурных полей позволяют оценить фактический запас прочности (несу-

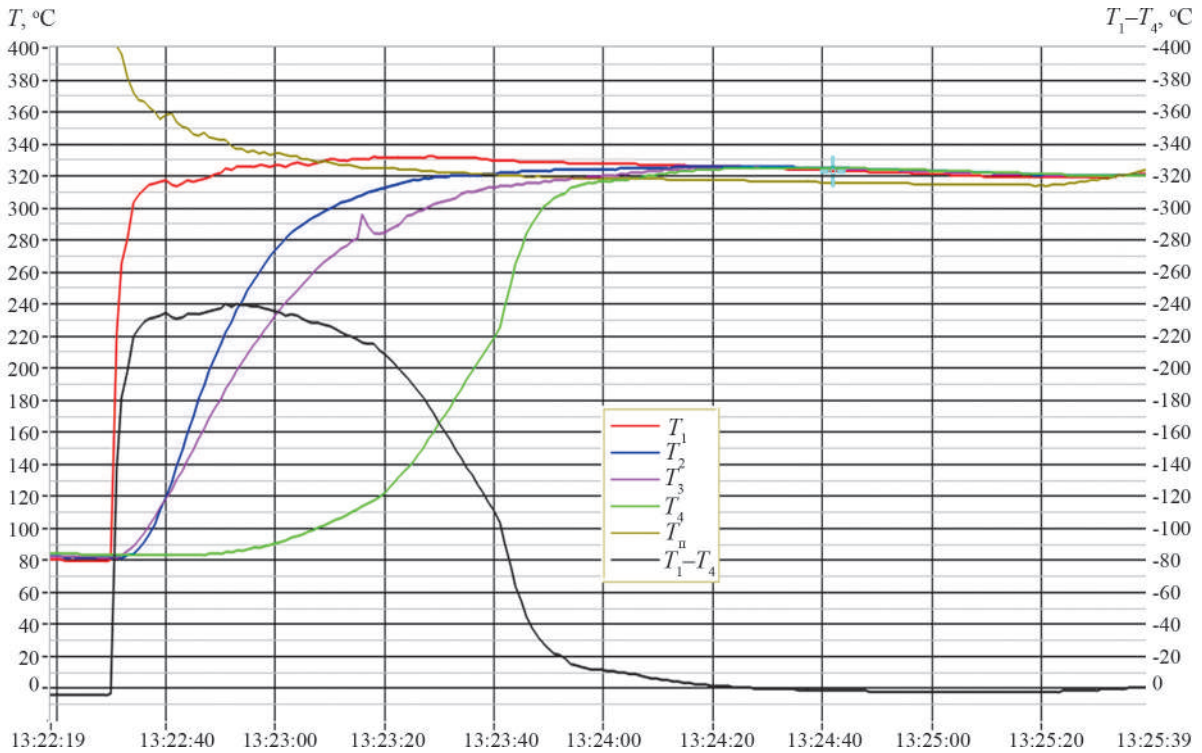


Рис. 5. Изменение температуры по сечению образца каната при погружении в расплавленный свинец

щей способности) каната в горячем состоянии с учетом влияния температурного градиента на распределение напряжений в проволоках прядей.

Предположим, что канат отработал  $N$  термоциклов (залывок чугуна в конвертер) при которых его внешняя поверхность нагревалась до максимальной температуры  $T$ .

Запас прочности каната  $n(T, N)$  при номинальном натяжении  $P$  определяется по отношению к агрегатной разрывной нагрузке  $P_{a,T}(T, N)$  как

$$n(T, N) = \frac{P_{a,T}(T, N)}{P}.$$

Нижний индекс  $T$  относится ко всем параметрам, вводимым для каната в горячем состоянии. Номинальное натяжение каната при полном ковше составляет  $P = 174$  кН.

Достижение предельной нагрузки  $P_{a,T}(T, N)$  свяжем с разрушением одной из несущих компонент каната, а именно, сердечника или внешних прядей. Обрыв любого из этих элементов структуры означает отказ каната в целом.

Удовлетворительные для практики оценки могут быть сделаны, если рассматривать канат как статически неопределимую двухкомпонентную стержневую систему. Первая компонента включает проволоки внешних прядей, вторая — проволоки сердечника. Обе компоненты растягиваются вдоль оси каната на одну и ту же величину.

Канат диаметром 42 мм, изготовленный согласно ТУ-14-4-273-2002, имеет шесть внешних прядей об-

щей площадью сечения  $A_1 = 755$  мм<sup>2</sup> и стальной сердечник площадью сечения  $A_2 = 107$  мм<sup>2</sup> (индекс 1 относится к группе проволок внешних прядей, индекс 2 — к группе проволок сердечника).

Пусть  $\Delta T = T_1 - T_2 > 0$  — перепад средних температур  $T_1, T_2$  проволоки внешних прядей и сердечника в процессе заливки чугуна в конвертер. Исходя из опытных данных, примем  $\Delta T = 200$  °C. Будем считать, что в допустимом температурном режиме заливки можно пренебречь влиянием нагрева на модуль упругости  $E$  и коэффициент температурного расширения  $\alpha$  материала проволок.

Обозначим через  $\sigma_u(T, N)$  предел прочности проволоки, нагревавшихся до температуры  $T$  в течение времени заливки (5...7 мин) на протяжении  $N$  термоциклов. Данную прочностную характеристику обычно определяют в опытах на разрыв отработавших проволок в холодном состоянии [2]. Реальный предел прочности материала проволок в горячем состоянии  $\sigma_{u,T}(T, N)$  отличается от  $\sigma_u(T, N)$  коэффициентом  $\gamma(T, N) < 1$ :

$$\sigma_{u,T}(T, N) = \gamma(T, N)\sigma_u(T, N).$$

Эксперименты показывают, что множитель  $\gamma(T, N)$  меняется в пределах 0,65...0,75 в диапазоне 200...400 °C, понижаясь с ростом температуры и числа циклов [6].

В стержневом приближении нормальные напряжения в проволоках внешних прядей и сердечника равны

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} - \frac{E\alpha\Delta TA_2}{A};$$

$$\sigma_2 = \frac{P}{A} + \frac{E\alpha\Delta TA_1}{A},$$

где  $A = A_1 + A_2$  — расчетная площадь сечения всех проволок каната.

С увеличением силовой нагрузки на канат первыми разрушатся проволоки сердечника, если

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

В этом случае предельное усилие каната, как системы параллельно работающих проволок, определяется выражением

$$P_{\Sigma,T} = \sigma_{u,T}(T_2, N)A - E\alpha\Delta T A_1.$$

При выполнении условия

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

с ростом нагрузки  $P$  первыми достигают предела прочности напряжения в проволоках внешних прядей, а предельное усилие на канат выглядит как

$$P_{\Sigma,T} = \sigma_{u,T}(T_1, N)A + E\alpha\Delta T A_2.$$

Анализ возможных отказов каната с использованием опытных данных о пределе прочности  $\sigma_{u,T}(T, N)$  проволок из стали 70 в горячем состоянии [6] показывает, что первый вариант (рвется сердечник) возможен в температурном диапазоне  $T_1 = (200...350)$  °С. Второй вариант (рвутся внешние пряди) гипотетически вероятен при  $T_1 > (375...400)$  °С вследствие значительного снижения предела прочности внешних проволок. Возможна ситуация, когда внешние пряди и сердечник рвутся одновременно.

Предельное агрегатное разрывное усилие каната в горячем состоянии  $P_{a,T}(T, N)$  пересчитывается через суммарное предельное усилие проволок  $P_{\Sigma,T}(T, N)$  с помощью эмпирического коэффициента  $k_r$ , учитывающего винтовую структуру каната [7].

Исходя из результатов испытаний на агрегатную прочность и суммарную прочность проволок  $k_r = 0,85...0,92$ .

Изменение коэффициента запаса прочности горячего каната  $n(T, N)$  в зависимости от параметров температурного режима  $T_1, N$  приведено на рис. 6. Заметное влияние количества термоциклов (заливок) на прочность начинает сказываться при амплитудных температурах выше 350 °С. В литейном цехе среднее число заливок в сутки на разных кранах составляет 25...30. В документах, регламентирующих правила безопасной эксплуатации литейных кранов, приведены рекомендации относительно требуемых запасов прочности горячих канатов [8, 9]. При назначении критического запаса прочности полученные зависимости  $n(T, N)$  позволяют приблизительно очертить двухпараметрическую область допустимых рабочих состояний каната в координатах температура–количество термоциклов. Если температурный режим попадает в недопустимую область, канат должен быть снят с эксплуатации.

Полезно сравнить полученные оценки прочности горячего каната в условиях, близких к реальным, с проектным запасом прочности каната в состоянии по-

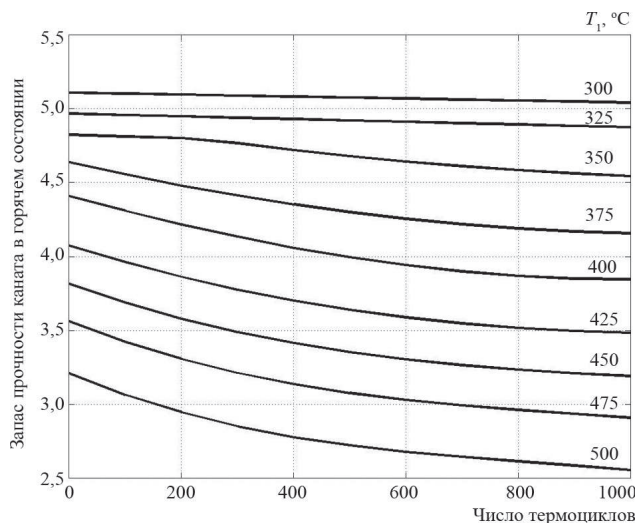


Рис. 6. Изменение запаса прочности каната в горячем состоянии от температуры и количества термоциклов

ставки. Согласно [4], грузовые канаты спецификации ТУ-14-4-273-2002 диаметром 42 мм подбираются в расчете на разрывное усилие в целом (агрегатную прочность)  $P_a = 1235$ кН для проволок маркировочной группы 1770 Н/мм<sup>2</sup> с коэффициентом использования  $z_p = 7,10$ . Испытания показали, что предел прочности проволок данной группы равен в среднем 1870 Н/мм<sup>2</sup>, поэтому новый канат в холодном состоянии имеет фактический запас прочности  $n > z_p$ . В условиях термоциклических нагрузок его реальная прочность, как следует из рис. 6, оказывается существенно меньше. Это обстоятельство стоит принимать во внимание при контроле над техническим состоянием канатов литейных кранов в процессе эксплуатации [10].

### Выводы

Результаты лабораторных термических испытаний могут быть использованы для отработки методики дистанционного измерения температуры грузовых канатов заливочных кранов конвертерного производства в естественных условиях производственного цикла с целью контроля допустимых рабочих режимов.

Проведенные испытания позволяют оценить важнейший фактор термического воздействия на канат, а именно температурный градиент, возникающий в сечении грузового каната заливочного крана в первые моменты заливки чугуна в конвертор, который во многом определяет несущую способность каната при термоциклическом нагружении.

Опытные данные, полученные в лабораторных условиях, могут служить основанием для разработки оценочных критериев предельного состояния канатов, которые, в свою очередь, являются ориентиром при назначении режимов заливки чугуна в конвертер.

Эксплуатация каната сопровождается высоким риском, когда температура его поверхности превышает 450 °С на протяжении нескольких заливок.



## Литература

## References

1. **Горицкий В.М.** Тепловая хрупкость стали. М.: Металлургиздат, 2007.
2. **Силуянова Н.Н., Лобанова Е.Н.** Температурное воздействие на стальные канаты // Стальные канаты. 2005. Вып. 4. С. 202—205.
3. **ISO 4309:2017.** Cranes — Wire Ropes — Care, Maintenance, Installation, Examination and Discard.
4. **Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов.** М.: ГУП «НТЦ Промышленная безопасность» Госгортехнадзора России, 2002. Сер. 10. Вып. 7.
5. **Малов В.П. и др.** Влияние термоциклических нагрузок на прочность канатов литейных кранов // Безопасность труда в промышленности. 1999. № 11. С. 30—32.
6. **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.
7. **Малиновский В.А.** Стальные канаты. Одесса: Астропринт, 2016.
8. **Bridon Crane Rope Catalogue.** Doncaster. South Yorkshire, 2011.
9. **Hot Metal Cranes: What is Required?** Tech. Crane Rep. [Электрон. ресурс] [http://www.naicranes.com/engineering/technical\\_reports/hotmetal.pdf](http://www.naicranes.com/engineering/technical_reports/hotmetal.pdf) (дата обращения 10.12.2017).
10. **Сухоруков В.В., Воронцов А.Н., Волоховский В.Ю.** Контроль канатов заливочных кранов металлургических предприятий // Черные металлы. 2013. № 10 (982). С. 56—60.

1. **Горитский В.М.** Teplovaya Khrupkost Staly. M.: Metallurgizdat, 2007. (in Russian).
2. **Siluyanov N.N., Lobanova E.N.** Temperaturnoe Vozdeystvie na Stalnye Kanaty. Stalnye Kanaty. 2005;4:202—205. (in Russian).
3. **ISO 4309:2017** Cranes — Wire Ropes — Care, Maintenance, Installation, Examination and Discard.
4. **Promyshlennaya Bezopasnost pri Ekspluatatsyi Gruzogodemnykh Kranov.** M.: GUP «NTC Promyshlennaya Bezopasnost» Gosgortehнадзора Rossyi. 2002;10;7. (in Russian).
5. **Malov V.P. i dr.** Vliyanie Termotciklicheskih Nagrusok na Prochnost Kanatov Liteynykh Kranov. Bezopasnost Truda v Promyshlennosti. 1999;11:30—32. (in Russian).
6. **Matyunin V.M., Volokhovskiy V.Yu., Vorontsov A.N.** Izmenenie Mekhanicheskikh Svoistv Provolok Gruzovykh Kanatov Liteynykh Kranov pod Vozdeistviem Ekspluatatsionnykh Faktorov. Tekhnologiya Metallov. 2011;7:14—19. (in Russian).
7. **Malinovsky V.A.** Stalnye Kanaty. Odessa: Astroprint, 2016. (in Russian).
8. **Bridon Crane Rope Catalogue.** Doncaster. South Yorkshire, 2011.
9. **Hot Metal Cranes: What is Required?** Tech. Crane Rep. [Elektron. Resurs] [http://www.naicranes.com/engineering/technical\\_reports/hotmetal.pdf](http://www.naicranes.com/engineering/technical_reports/hotmetal.pdf) (Data Obra-shcheniya 10.12.2017).
10. **Sukhorukov V.V., Vorontsov A.N., Volokhovskiy V.Yu.** Kontrol Kanatov Zalivochnykh Kranov Metallurgicheskyykh Predpriyatyi. Chernye Metally. 2013; 10(982):56-90. (in Russian).

## Сведения об авторах:

- Воронцов Александр Николаевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин НИУ «МЭИ», e-mail: VorontsovAN@mpei.ru
- Волоховский Василий Юрьевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин НИУ «МЭИ», e-mail: VolokhovskiyVYu@mpei.ru
- Мирошниченко Владимир Иванович** — кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной теплофизики НИУ «МЭИ» e-mail: vim@cati.ru
- Гайдученко Владимир Васильевич** — ведущий специалист ООО «ЦАТИ»
- Устинов Антон Васильевич** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры инженерной теплофизики НИУ «МЭИ», e-mail: anton@vxi.ru

## Information about authors:

- Vorontsov Aleksandr N.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Robotics, Mechatronics and Machines Dynamic and Strengt Dept., NRU MPEI, e-mail: VorontsovAN@mpei.ru
- Volokhovskiy Vasilij Yu.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Robotics, Mechatronics and Machines Dynamic and Strengt Dept., NRU MPEI, e-mail: VolokhovskiyVYu@mpei.ru
- Miroshnichenko Vladimir I.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Engineering Thermophysics Dept., NRU MPEI, e-mail: vim@cati.ru
- Gaiduchenko Vladimir V.** — Leading Specialist of Open Company «CATI»
- Ustinov Anton V.** — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of Engineering Thermophysics Dept., NRU MPEI, e-mail: anton@vxi.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 31.01.2018

**The article received to the editor:** 31.01.2018