

УДК (UDC) 613.6: 667

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
СЧАЛИВАНИЯ (СРАЩИВАНИЯ) СТАЛЬНОГО КАНАТА**
MATHEMATICAL MODEL OF SPLICING OF STEEL CABLEКороткий А.А., Марченко Э.В., Панфилов А.В.
Korotkiy A.A., Marchenko E.V., Panfilov A.V.Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Аннотация. В статье представлены материалы по исследованию математического моделирования счаливания (сращивания) стального каната, используемого для передачи тягового усилия силами трения. Разработанная математическая модель счаливания, описывает напряженно-деформированное состояние прядей (проволок) от квазистатических нагрузок, возникающих в процессе циклического растяжения и изгиба стального каната на тяговом шкиве, при котором равнодействующая сил в поперечном сечении стального каната смещается относительно центральной оси, вызывая его изгиб и кручение. Используя экспериментальные данные, установлено, что кручение и изгиб стального каната вызван технологией счалки в узлах, где происходит замещение прядей. Экспериментально установлено, что дефекты на участке счаливания проявляются в результате циклических растягивающих и изгибных нагрузок на шкиве, что связано с ограниченной подвижностью прядей в узлах из-за нарушения симметричности поперечного сечения. При растяжении и изгибе на шкиве нагрузка между прядями каната распределяется крайне неравномерно, что, в конечном счете, приводит к его внецентренному растяжению и образованию дефекта «волнистость». Математическая модель описывает процесс счаливания (сращивания) стального каната с учетом существующей технологии, нарушающей симметрию поперечного сечения в узлах, которая, в результате квазистатических нагружений, развивается до критических значений браковочного показателя «волнистость».

Ключевые слова: стальной канат, сращивание (счаливание), математическая модель, напряженно-деформированное состояние, внецентренное растяжение, критерии браковки, волнистость.

Дата принятия к публикации: 26.05.2019
Дата публикации: 25.09.2019

Сведения об авторах:

Короткий Анатолий Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика», Донской государственный технический университет, e-mail: korot@novoch.ru.

Abstract. The article presents materials on the study of mathematical modeling of jointing (splicing) of a steel rope used to transfer the traction force by friction forces. The developed mathematical model of jointing describes the stress-strain state of strands (wires) from quasi-static loads arising in the process of cyclic stretching and bending of the steel rope on the traction pulley, in which the resultant force in the pop-river section of the steel rope shifts relative to the central axis, causing its bending and twisting. Using experimental data, it is established that the torsion and bending of the steel rope is called the technology of jointing in the nodes where the replacement of strands occurs. It is experimentally established that defects in the area of jointing (splicing) are manifested as a result of cyclic tensile and bending loads on the pulley, which is associated with limited mobility of the strands in the nodes due to a violation of the symmetry of the cross section. When stretching and bending on the pulley, the load between the strands of the rope is distributed very unequally, which ultimately leads to its out-of-center stretching and the formation of a "wavy" defect. The mathematical model describes the process of jointing (splicing) of the steel plate, taking into account the existing technology that violates the symmetry of the cross section in the nodes, which, as a result of quasi-static loads, develops to critical values of the rejection index "waviness".

Keywords: steel rope, splicing (jointing), mathematical model, stress-strain state, off-center tension, rejection criteria, waviness.

Date of acceptance for publication: 26.05.2019
Date of publication: 25.09.2019

Authors' information:

Anatoliy A. Korotkiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of "Operation of transport systems and logistics" at Don State Technical University, e-mail: korot@novoch.ru.



Марченко Эдвард Викторович – аспирант, ассистент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика», Донской государственной технической университет,
e-mail: daedwardrambler.ru@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7027-7716>

Панфилов Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры. «Эксплуатация транспортных систем и логистика», Донской государственной технической университет,
e-mail: panfilov@ikcmysl.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7211-1824>

1. Введение

Важнейшим элементом для машин, передающих тяговое усилие канатной тягой, является стальной канат. Для изготовления кольцевого участка стального каната необходимо выполнять сращивание (счаливание) двух его концов. Такое сращивание включает соединение концов посредством повторного переплетения половины прядей каждого из концов каната с образованием стыковочных замков между парой пересекающихся прядей, а также вплетение каждой из прядей в место стыковочных замков, соответствующее длине сращивания, из которого предварительно была удалена сердцевина. Существующая технология сращивания нарушает симметрию поперечного сечения в узлах, которая в результате квазистатических нагрузений развивается до критических значений браковочного показателя «волнистость» [1].

Под сращиванием (счаливанием) понимается участок стального каната, содержащий стыковочные замки, количество которых равно удвоенному числу прядей каната, и по два соответствующих участка, непосредственно примыкающих к стыковочному замку, вдоль которых две соединенных в замок соответствующие пряди заправлены в пространство сердцевины каната.

Надежность, безопасность, долговечность и стойкость работы машин с канатной тягой во многом зависит от качества сращивания стального каната [7].

2. Постановка задачи

Анализ стойкости несущие-тяговых стальных канатов подвесных пассажирских ка-

Edward V. Marchenko - Postgraduate student, Assistant lecturer of Department "Operation of transport systems and logistics" at Don State Technical University, *e-mail: daedwardrambler.ru@mail.ru*
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7027-7716>

Alexey V. Panfilov – Candidate of Technical Sciences, associate Professor, associate Professor of Department of "Operation of transport systems and logistics" at Don State Technical University,
e-mail: panfilov@ikcmysl.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7211-1824>

натных дорог, свидетельствует о том, что сращивание является наиболее уязвимым участком с точки зрения надежности, безопасности и долговечности. Несмотря на заявляемую заводом-изготовителем высокую стойкость (ресурс) стальных канатов (15...20 лет эксплуатации), установлено, что уже через 5...6 лет появляются структурные дефекты в местах сращивания, а именно [4, 5]:

- наружный износ проволок;
- обрывы проволок;
- уменьшение диаметра каната в результате повреждения сердечника;
- потеря внутреннего сечения;
- образование «волнистости».

Наличие наружного износа проволок прядей подтверждает, что данный дефект на участке сращивания образовывается при квазистатическом циклическом огибании шкива за счет трения смежных прядей стального каната в процессе их относительного кручения и перемещения. Напряженно-деформированное состояние проволоки при изгибе стального каната на шкиве возрастает за счет дополнительных изгибающих и растягивающих напряжений от волнистости, суммарное значение которых зачастую превышает расчетные, что приводит к обрыву проволок. Экспериментально установлено наличие коррозии, что свидетельствует об отсутствии смазки в стыковочном замке в процессе касания прядей и проволок при взаимном их скольжении и вращении [2].

Уменьшение диаметра каната на участке сращивания является результатом повреждения сердцевины. Потеря внутреннего сечения сердцевины свидетельствуют о наличии дополнительного кручения отдельных прядей вокруг своей оси и перемещения относительно друг друга. Данный дефект вызван

отсутствием равномерной подвижности всех прядей каната при циклическом огибании на отклоняющем блоке или приводном шкиве (барабане) в результате «закусывания» одной из прядей на участке счаливания в стыковочном замке [3].

Сращивание образует локализованную длину, на которой происходит передача нагрузки несущо-тяговым стальным канатом, имеющим разрывы целостности прядей (проволок) силами трения, возникающими между прядями (проводами) [8]. К тому же, на длине сращивания несущо-тяговых стальных канатов происходит нарушение геометрического положения прядей и сердцевины в их поперечном сечении, в частности:

- вблизи стыковочных замков, образованных из пар пересекающихся прядей каната;
- неравномерное распределение зазора между наружными прядями по обе стороны от стыковочных замков вдоль участка сращивания, где соединенные в стыковочный замок пряди заправлены в область сердцевины;
- вблизи конца каждой из участков сращивания.

Все перечисленные особенности участка сращивания приводят к перераспределению усилий между прядями при передаче тяговой нагрузки стальным канатом, следствием которого является дефект «волнистость», являющийся браковочным показателем.

Образование дефекта «волнистость» вызвано неравномерностью нагружения прядей в результате смещения равнодействующего усилия в поперечном сечении сращивания стального каната, вызванного нарушением симметрии поперечного сечения в узлах, что значительно снижает уровень его безопасности и приводит к значительным материальным затратам при его замене.

3. Разработанная методика

Рассмотрим физические процессы, происходящие на участке сращивания стального каната в процессе его квазистатического нагружения при циклическом изгибе на шкиве. Экспериментально установлено, что в процессе изгиба каната происходит взаимное перемещение прядей. Прядь, опираясь на

сердцевину, имеет продольное и угловое перемещение при сохранении тангенциального зазора между прядями. Отсутствие тангенциального зазора в поперечном сечении узла сращивания, а, следовательно, и отсутствие необходимой подвижности прядей («закусывание») в стыковочном замке приводит к перераспределению усилия между прядями, т.е. к внецентренному растяжению стального каната в целом, что в конечном итоге приводит к образованию дефекта «волнистость». При эксплуатации стального каната одна из его прядей на участке сращивания в узлах передает нагрузку другой пряди силами трения [6]. В представленной ниже математической модели силами трения пренебрегают, заменив их тангенциальным зазором, имеющим различные значения в поперечном сечении узла на участке сращивания.

Для составления математической модели сращивания рассмотрим известную расчетную схему для определения силовых факторов, действующих в элементах стального каната. Введем в каждом поперечном сечении элемента стального каната систему координат t, n, a (триэдр - τ), так что ось t будет направлена по касательной, а n и a , соответственно, по главной нормали и бинормали к винтовой оси его элемента. Ось элемента предполагается проходящей через центры тяжести его поперечного сечения (рис. 1).

Пользуясь известными соотношениями аналитической геометрии, через α и φ получим направляющие косинусы (табл. 1) между системами координат τ и x, y, z .

Чтобы установить связь внутренних сил с внешними, приложенными в узле (замке) счалки стального каната, необходимо перейти к глобальной системе координат x, y, z , связанной с его поперечным сечением. Для этого воспользуемся направляющими косинусами системы (табл. 1) и спроектируем вектор S из осей координат t, n, a на оси координат x, y, z , получив:

$$\begin{aligned} S_{x_i} &= S_{t_i} \cos \alpha + S_{a_i} * \sin \alpha; \\ S_{y_i} &= S_{t_i} * \sin \alpha * \cos \varphi_i + S_{n_i} * \sin \varphi - \\ &\quad S_{a_i} * \cos \alpha * \cos \varphi_i; \\ S_{z_i} &= S_{t_i} * \sin \alpha * \sin \varphi_i + S_{n_i} * \cos \varphi + \\ &\quad S_{a_i} * \cos \alpha * \sin \varphi_i. \end{aligned} \quad (1)$$

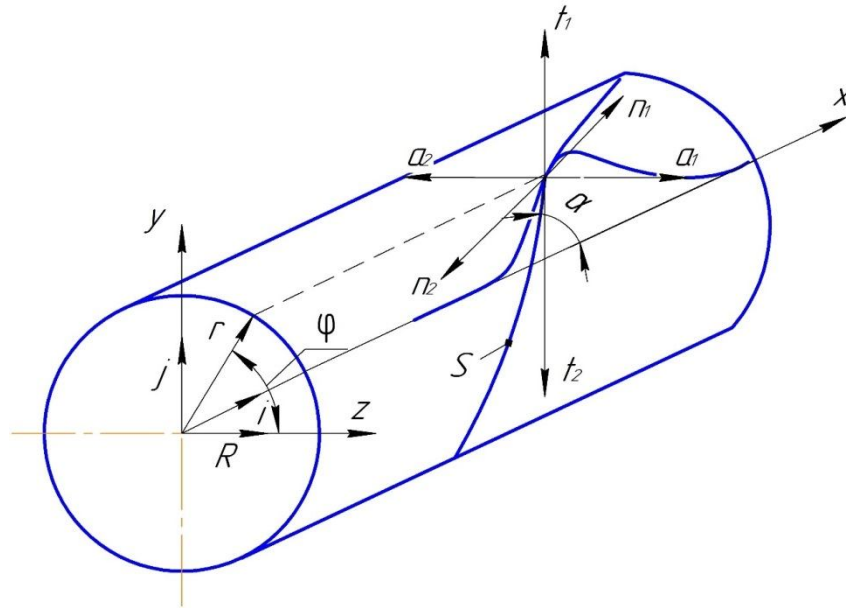


Рис. 1. Схема системы координат для расчета силовых факторов, действующих в элементах стального каната на участке счалки

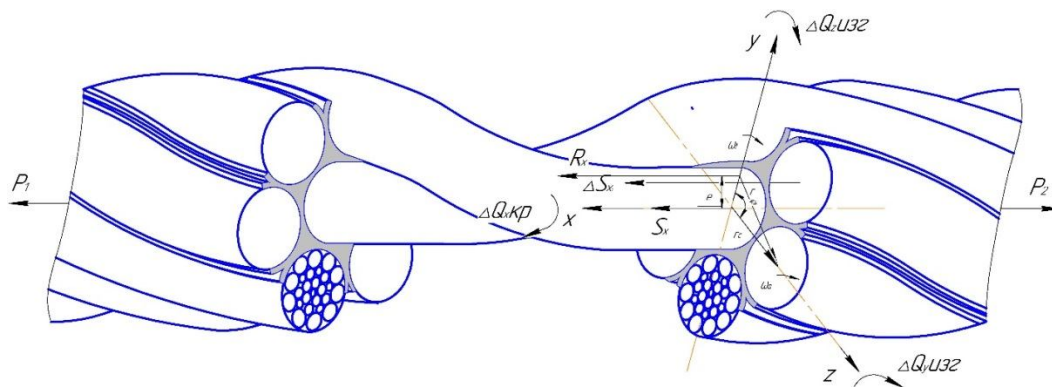


Рис. 2. Распределение внутренних усилий в поперечном сечении стального каната, проходящем через стыковочный узел на участке сращивания

Таблица 1

Направляющиеся косинусы системы

Индексы	Оси		
	x	y	z
t	cosa	sina*cosφ	sina*sinφ
n	0	sinφ	cosφ
a	sina	cosa*cosφ	cosa*sinφ

Учитывая выражение (1), проекции внутренних сил на оси координат x, y, z запишем:

$$Q_{x_i} = F_{t_i} * cosa + F_{a_i} * sina + r_i(S_{t_i} * sina - S_{a_i} * cosa);$$

$$Q_{y_1} = F_{t_i} * sina * cosφ_i + F_{n_i} * sinφ_1 - F_{a_i} * cosa * cosφ_i - (S_{t_i} * cosa + S_{a_i} * sina) r_i * cosφ_i; \quad (2)$$

$$Q_{z_i} = F_{t_i} * sina * sinφ_i + F_{n_i} * cosφ_i + F_{a_i} * cosa * sinφ_i - (S_{t_i} * cosa + S_{a_i} * sina) r_i * sinφ_i;$$

где $S_{x_i}, S_{y_i}, S_{z_i}, Q_{x_i}, Q_{y_i}, Q_{z_i}$ – внешние силы относительно осей координат x, y, z соответственно; $S_{t_i}, S_{n_i}, S_{a_i}, F_{t_i}, F_{n_i}, F_{a_i}$ – внутренние силы относительно осей координат t, a, n соответственно.

Полагая $\frac{dF_{a_i}}{ds} = M_{n_i} = 0$, из системы уравнений Кирхгофа имеем:

$$S_{a_i} = \omega_{a_i} * F_{t_i} - \omega_{t_i} * F_{a_i}, \quad (3)$$

где ω_{t_i} - кручение; ω_{a_i} - кривизна в плоскости t, n .

Подставляя значение (3) в (1) и (2), имеем:

$$S_{x_i} = S_{t_i} * \cos\alpha + (\omega_{a_i} * F_{t_i} - \omega_{t_i} * F_{a_i}) * \sin\alpha;$$

$$S_{y_i} = S_{t_i} * \sin\alpha * \cos\varphi_i - (\omega_{a_i} * F_{t_i} - \omega_{t_i} * F_{a_i}) * \cos\alpha * \cos\varphi_i; \quad (4)$$

$$S_{z_i} = S_{t_i} * \sin\alpha * \sin\varphi_i + (\omega_{a_i} * F_{t_i} - \omega_{t_i} * F_{a_i}) * \cos\alpha * \sin\varphi_i;$$

$$Q_{x_i} = F_{t_i} * \cos\alpha + F_{a_i} * \sin\alpha + S_{t_i} * r_i * \sin\alpha - r_i * \cos\alpha (\omega_{a_i} * F_{t_i} - \omega_{t_i} * F_{a_i});$$

$$Q_{y_i} = F_{t_i} * \sin\alpha * \cos\varphi_i - F_{a_i} \cos\alpha * \cos\varphi_i - S_{t_i} * \cos\alpha * \cos\varphi_1 * r_i - r_i * \sin\alpha * \cos\varphi_i (\omega_{a_i} * F_{t_i} - \omega_{t_i} * F_{a_i}) +$$

$$F_{n_i} * \sin\varphi_i; \quad (5)$$

$$Q_{z_i} = -F_{t_i} * \sin\alpha * \sin\varphi_i + F_{a_i} * \cos\alpha * \sin\varphi_i + S_{t_i} * \cos\alpha * \sin\varphi_i * r_i + r_i * \sin\alpha * \sin\varphi_i (\omega_{a_i} * F_{t_i} - \omega_{t_i} * F_{a_i}) +$$

$$F_{n_i} * \cos\varphi_i.$$

Учитывая, что

$$\omega_{a_i} = \frac{\sin^2\alpha}{r_i};$$

$$\omega_{t_i} = \frac{\sin\alpha * \cos\alpha}{r_i}; \quad (6)$$

$$\omega_{n_i} = 0,$$

получим:

$$S_{x_i} = S_{t_i} * \cos\alpha + \frac{\sin^3\alpha}{r_i} * F_{t_i} - \frac{\sin^2\alpha * \cos\alpha}{r_i} * F_{a_i};$$

$$S_{y_i} = S_{t_i} * \sin\alpha * \cos\varphi_i - \frac{\sin^2\alpha}{r_i} * \cos\alpha * \cos\varphi_i * F_{t_i} - \frac{\sin\alpha * \cos^2\alpha}{r_i} * F_{a_i};$$

$$S_{z_i} = -S_{t_i} * \sin\alpha * \cos\varphi_i + \left(\frac{\sin^2\alpha}{r_i} * F_{t_i} - \frac{\sin\alpha * \cos\alpha}{r_i} * F_{a_i} \right) * \cos\alpha * \sin\varphi_i;$$

$$Q_{x_i} = F_{t_i} * \cos\alpha + F_{a_i} * \sin\alpha + S_{t_i} * r_i * \sin\alpha - F_{t_i} * \cos\alpha * \sin^2\alpha + F_{a_i} * \sin\alpha * \cos^2\alpha;$$

$$Q_{y_i} = F_{t_i} * \sin\alpha * \cos\varphi_i - F_{a_i} \cos\alpha * \cos\varphi_i - S_{t_i} * \cos\alpha * \cos\varphi * r_i - F_{t_i} * \sin^3\alpha * \cos\varphi_i + F_{a_i} \sin^2\alpha * \cos\varphi * \cos\varphi_i;$$

$$Q_{z_i} = -F_{t_i} * \sin\alpha * \sin\varphi_i + F_{a_i} * \cos\alpha * \sin\varphi_i * \sin\varphi_i + S_{t_i} * \cos\alpha * \sin\varphi_i * r_i + F_{t_i} * \sin^3\alpha * \sin\varphi_i + F_{a_i} \sin^2\alpha * \cos\alpha * \sin\varphi_i.$$

Преобразуя систему (8), получим:

$$Q_{x_i} = F_{t_i} * \cos\alpha + F_{a_i} * \sin\alpha + S_{t_i} * r_i * \sin\alpha - F_{t_i} * \cos\alpha * \sin^2\alpha + F_{a_i} * \sin\alpha * \cos^2\alpha;$$

$$Q_{y_i} = F_{t_i} * \sin\alpha * \cos\varphi_i - F_{a_i} \cos\alpha * \cos\varphi_i - S_{t_i} * \cos\alpha * \cos\varphi * r_i - F_{t_i} * \sin^3\alpha * \cos\varphi_i + F_{a_i} \sin^2\alpha * \cos\varphi * \cos\varphi_i;$$

$$Q_{z_i} = -F_{t_i} * \sin\alpha * \sin\varphi_i + F_{a_i} * \cos\alpha * \sin\varphi_i * \sin\varphi_i + S_{t_i} * \cos\alpha * \sin\varphi_i * r_i + F_{t_i} * \sin^3\alpha * \sin\varphi_i + F_{a_i} \sin^2\alpha * \cos\alpha * \sin\varphi_i. \quad (11)$$

Компоненты главного момента по осям в поперечном сечении одного слоя элементов узла счалки каната будут равны:

$$Q_{кр} = \sum_{i=1}^n Q_x;$$

$$Q_y = \sum_{i=1}^n Q_y; \quad (12)$$

$$Q_z = \sum_{i=1}^n Q_z,$$

где n - число элементов в слое узла счалки.

Запишем (9), (10), (11) с учетом (12), получим:

$$Q_{кр} = \sum F_{t_i} * \cos^3\alpha + \sum F_{a_i} * \sin\alpha (1 + \cos^2\alpha) + \sum S_{t_i} * r_i * \sin\alpha;$$

$$Q_y = \sum F_{t_i} * \cos^2\alpha * \sin\alpha * \cos\varphi_i - \sum F_{a_i} * \cos^3\alpha * \cos\varphi_i - \sum S_{t_i} * r_i * \cos\alpha * \cos\varphi_i;$$

$$Q_z = -\sum F_{t_i} * \cos^2\alpha * \sin\alpha * \cos\varphi_i + \sum F_{a_i} * \cos^3\alpha * \sin\varphi_i + \sum S_{t_i} * r_i * \cos\alpha * \sin\varphi_i. \quad (13)$$

В этих уравнениях F_t, F_a, S_t зависят от технологии сращивания стальных канатов, что связано с нарушением симметрии (зазоров) в поперечном сечении узлов и эксплуатационных нагрузок. В процессе изготовления счалки в узлах нарушается геометрическая симметрия сечения и изменяются тангенциальные зазоры за счет вплетения (замещения) дополнительной пряжи в замещающую сердцевину.

На линейном участке при соблюдении симметрии поперечного сечения с наличием одинаковых тангенциальных зазоров в зоне упругих деформаций стальной канат являет-

ся самоуравновешивающейся системой, у которой

$$Q_y = 0, Q_z = 0. \quad (14)$$

Следовательно, каких-либо структурных изменений, связанных с изменением прямолинейности центральной оси стального каната, не происходит.

Однако на участке счалки стального каната все составляющие системы (13) в той или иной степени имеют место, количественно отличающееся для каждого поперечного сечения узла счалки. Следовательно, стальной канат не является самоуравновешивающейся системой и внутренние силы в нем для каждой пряди, в том числе, для замещающей имеют определенные значения, которые могут отличаться по величине, а в некоторых случаях и по знаку.

При достижении эксплуатационной нагрузки в каком-либо элементе стального каната (провода, пряди) величины, при которой происходят пластические деформации, происходят структурные изменения в виде волнистости.

Запишем систему (13) с учетом вышесказанного в целом для стального каната:

$$\begin{aligned} Q_{кр} + \Delta Q_{кр} &= (\sum F_{t_i} + \Delta \sum F_{t_i}) * \cos^3 \alpha + (\sum F_{a_i} + \Delta \sum F_{a_i}) * \sin \alpha (1 + \cos^2 \alpha) + (\sum S_{t_i} + \Delta \sum S_{t_i}) * r_i * \sin \alpha; \\ Q_y + \Delta Q_y &= (\sum F_{t_i} + \Delta \sum F_{t_i}) * \cos^2 \alpha * \sin \alpha * \cos \varphi_i - (\sum F_{a_i} + \Delta \sum F_{a_i}) * \cos^3 \varphi_i * \cos \varphi_i - (\sum S_{t_i} + \Delta \sum S_{t_i}) * r_i * \cos \alpha * \cos \varphi_i; \\ Q_z + \Delta Q_z &= -(\sum F_{t_i} + \Delta \sum F_{t_i}) * \cos^2 \alpha * \sin \alpha * \cos \varphi_i - (\sum F_{a_i} + \Delta \sum F_{a_i}) * \cos^3 \alpha * \sin \varphi_i + (\sum S_{t_i} + \Delta \sum S_{t_i}) * r_i * \cos \alpha * \cos \varphi_i. \end{aligned} \quad (15)$$

где $\sum S_t$, $\sum F_t$, $\sum F_a$ - внутренние силы и моменты в канате, создающие самоуравновешивающуюся систему при идеальных условиях; $\sum \Delta S_t$, $\sum \Delta F_t$, $\sum \Delta F_a$ - внутренние дополнительные силы и моменты, возникающие в узлах счалки стального каната.

Запишем первое уравнение системы (15) с учетом вышесказанного

$$\Delta Q_{кр} = \sum F_{t_i} * \cos^3 \alpha + \sum F_{a_i} * \sin \alpha (1 + \cos^2 \alpha) + \Delta \sum S_{t_i} * \sin \alpha * r_i. \quad (16)$$

4. Экспериментальные результаты и их анализ

Проектируя внешние силы и моменты на оси координат t , n , a и выражая внутренние силы и моменты через внешние нагрузки, получим:

$$\begin{aligned} S_{t_i} &= S_{x_i} * \cos \alpha + r_i * f_{n_i}; \\ F_{t_i} &= S_{x_i} * r_i * \sin \alpha + Q_{x_i} * \cos \alpha - 2r_i^2 * f_{n_i} * \operatorname{ctg} \alpha; \\ F_{a_i} &= -S_{x_i} * r_i * \cos \alpha + Q_{x_i} * \sin \alpha + r_i^2 * f_{n_i} (\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1). \end{aligned} \quad (17)$$

Запишем (17) в приращениях, полагая, что внешний момент $Q_{x_i} = \text{const}$, а его изменение равно 0:

$$\begin{aligned} \Delta S_{t_i} &= \Delta S_{x_i} * \cos \alpha + \Delta f_{n_i} * r_i + f_{n_i} * r_i; \\ \Delta F_{t_i} &= \Delta S_{x_i} * r_i * \sin \alpha + S_{x_i} * \Delta r_i * \sin \alpha - 2f_{n_i} * \operatorname{ctg} \alpha * \Delta r_i^2 - 2\Delta f_{n_i} * \operatorname{ctg} \alpha * r_i^2; \\ \Delta F_{a_i} &= -\Delta S_{x_i} * r_i * \cos \alpha + S_{x_i} * \Delta r_i * \cos \alpha + \Delta r_i^2 * f_{n_i} (\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1) + r_i^2 * \Delta f_{n_i} (\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1). \end{aligned} \quad (18)$$

Рассмотрим решение поставленной задачи в зоне упругих деформаций при внешней видимом отсутствии «волнистости» (рис. 2).

Пренебрегая радиусом кривизны «волнистости» ρ , предполагая, что $\Delta S_{x_i}^2 = 0$, $\Delta f_{n_i} = 0$, $\Delta r_i = 1$ уравнение (17) запишем в виде:

$$\begin{aligned} \Delta S_{t_i} &= f_{n_i} * e; \\ \Delta F_{t_i} &= S_{x_i} * e * \sin \alpha - 2f_{n_i} * \operatorname{ctg} \alpha * e^2; \\ \Delta F_{a_i} &= S_{x_i} * e * \cos \alpha + e^2 f_{n_i} (\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1). \end{aligned} \quad (19)$$

Подставляя (18) в (15), получим:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{кр} &= \sum S_{x_i} * e * \sin \alpha * \cos^3 \alpha - \sum 2f_{n_i} * \operatorname{ctg} \alpha * e^2 * \cos^3 \alpha + \sum S_{x_i} * e * \sin \alpha * \cos \alpha (1 + \cos^2 \alpha) + e^2 \sum f_{n_i} (\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1) * \sin \alpha (1 + \cos^2 \alpha) \end{aligned} \quad (20)$$

Полагая, что

$$\sum S_{x_i} = S_x; \quad (21)$$

$$\sum f_{n_i} = 0, \quad (22)$$

тогда уравнение (19) запишем с учетом (21) и (22) в виде:

$$\Delta Q_{кр} = S_x * e * \sin \alpha * \cos \varphi (2 \cos^2 \alpha + 1). \quad (23)$$

Таким образом, в процессе каждой операции эксплуатационного нагружения, в том числе, растяжении и изгибе на шкиве, сталь-

ной канат должен испытывать деформации кручения, вызванные наличием эксцентриситета e .

Кручение стального каната на участке срачивания вызвано геометрическим изменением тангенциальных зазоров в поперечном сечении между прядями в узлах, предусмотренных ее технологией. Нагрузка между прядями распределяется крайне неравномерно, что, в конечном счете, приводит к внецентренному нагружению стального каната (рис. 2). Физическое расположение прядей стального каната в узлах счалки приводит к дополнительным нагрузкам, которые в процессе эксплуатации вызывают циклическое кручение, закономерные дополнительные напряжения в проволоках (прядях) и, как следствие, изгибу стального каната относительно центральной оси.

Если величина эксцентриситета незначительна (в элементах не наблюдаются пластические деформации), то кручение стального каната приводит к выравниванию осевого усилия S_{x_i} в его прядях. При этом продольные силы S_{t_i} в геометрически равноценных элементах стального каната за каждый цикл нагружения изменяются неодинаково. Одни из прядей оказываются перегруженными, а другие недогруженными. Описанный процесс взаимодействия прядей на участке счалки стальных канатов является одной из причин преждевременной браковки по причине усталостного разрушения отдельных проволок.

Внецентренное приложение нагрузки в поперечном сечении стального каната при нарушении технологии счаливания, может привести и к пластическим деформациям прядей. При пластической деформации стальной канат приобретает форму винтовой линии, характеризующейся браковочным показателем «волнистость». Кривизну волнистости возможно определить косвенным путем, пользуясь экспериментальными данными и аналитическими выражениями.

Как известно из [9], винтовая линия характеризуется радиусом свивки τ и углом наклона γ винтовой оси. Кручение и кривизну винтовой линии волнистости возможно записать:

$$K = \frac{\sin^2 \gamma}{r_b}; \quad (24)$$

$$\tau = \frac{\sin \gamma * \cos \gamma}{r_b};$$

$$\sin \gamma = \frac{tg \gamma}{\sqrt{1+tg^2 \gamma}}; \quad (25)$$

$$\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2 \gamma}};$$

получим:

$$tg \gamma = \frac{K}{\tau}; \quad (26)$$

$$r_b = \frac{K}{\tau^2 + K^2}.$$

Определим параметры волнистости на участке срачивания аналитическим путем, зная действующие нагрузки на стальной канат и его геометрические параметры зазоров в поперечном сечении узла, связанные с конструктивными особенностями технологии.

Учитывая, что кривизна K и кручение τ волнистости определяются выражениями

$$K = \frac{1}{\rho_0 + \left(\frac{\Delta_3}{\Delta}\right) * S_x * r_{b_0}}; \quad (27)$$

$$\tau = \frac{\sin \alpha * \cos \alpha}{r_{b_0}} + \frac{\Delta_2}{\Delta} * S_x * r_{b_0} \quad (28)$$

где $\frac{1}{\rho_0}$ - начальная кривизна; r_{b_0} - начальное значение радиуса участка с дефектом; Δ , Δ_2 , Δ_3 - определители агрегатных коэффициентов жесткости стального каната, определяемые по (25).

Подставляя (27) и (28) в (26), получим:

$$r_b = \frac{1}{\frac{\sin \alpha * \cos \alpha}{r_{b_0}} + \frac{\Delta_2}{\Delta} * S_x * r_{b_0} + \left(\frac{1}{\rho_0 + \left(\frac{\Delta_3}{\Delta}\right) * S_x * r_{b_0}}\right)^2} * \frac{1}{\rho_0 + \left(\frac{\Delta_3}{\Delta}\right) * S_x * r_{b_0}}; \quad (29)$$

$$tg \gamma = \frac{\frac{\sin \alpha * \cos \alpha}{r_{b_0}} + \frac{\Delta_2}{\Delta} * S_x * r_{b_0}}{\frac{1}{\rho_0 + \left(\frac{\Delta_3}{\Delta}\right) * S_x * r_{b_0}}}.$$

Дополнительные напряжения растяжения для прядей, расположенной на участке волнистости спирального стального каната, определим по формуле:

$$\sigma_s = E/\Delta * S_x * r_b (\Delta_1 * \cos^2 \alpha + \Delta_2 * r * \sin \alpha * \cos \alpha + \Delta_3 * r * \cos^2 \alpha) * \cos \varphi. \quad (30)$$

Для стального каната двойной свивки

$$\sigma_s = E/\Delta * S_x * r_b (\Delta_1 * \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \Delta_2 * r_k (\sin \beta * \cos \beta + r/r_k * \operatorname{tg} \alpha * \cos^4 \beta)) + \Delta_3 * r_k * \cos^2 \beta), \quad (31)$$

где E - модуль упругости первого рода; S_x - растягивающая нагрузка; r_b - радиус дефектного участка; r , r_k - радиусы пряди и каната; α , β - углы свивки проволок в пряди и прядей в канате; φ - полярный угол.

С точки зрения оценки безопасной эксплуатации стальных канатов по браковочным показателям в местах сращивания имеет интерес определить допустимое значение радиуса волнистости, исходя из условия прочности наиболее нагруженной проволоки. Суммарное напряжение в элементах подъемного каната с учетом геометрических параметров в узлах счалки определим по формуле:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_s \leq \sigma_b / n_{шт}, \quad (32)$$

где σ_0 - среднее напряжение в проволоках одного слоя от действия растягивающей силы S_x ; $n_{шт}$ - запас прочности наиболее нагруженной проволоки; σ_s - дополнительное напряжение, вызванное дефектом «волнистость».

Решая выражение (32) с учетом (30) и (31) относительно участка сращивания стального каната с различными значениями тангенциального зазора в сечении узла, выраженного через радиус волнистости, получим:

$$\frac{d_b}{d_k} \leq d_k + \frac{r_b}{r_k} \leq 1 + \frac{\sigma_b / n_{шт} - \sigma_0}{K_u * S_x * r_k}, \quad (33)$$

где d_b - диаметр спирали волнистости (рис.3); d_k - диаметр каната без дефекта; K_u - обобщенный коэффициент жесткости, учитывающий конструктивные особенности стального каната одинарной свивки:

$$K_u = E/\Delta * (\Delta_1 * \cos^2 \alpha + \Delta_2 * 2 \sin \alpha * \cos \alpha + \Delta_3 * r * \cos^2 \alpha), \quad (34)$$

двойной свивки:

$$K_u = E/\Delta * (\Delta_1 * \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \Delta_2 * r_k (\sin \beta * \cos \beta + r/r_k * \operatorname{tg} \alpha * \cos^4 \beta) + \Delta_3 * r_k * \cos^2 \beta). \quad (35)$$

Выражение (33) позволяет оценить несущую способность стального каната с учетом обнаруженного дефекта «волнистость» на участке сращивания.

Проведенные исследования позволили установить критерии браковочных показателей «волнистости» на участке сращивания стальных канатов по остаточным деформациям. Установлено, что на участке сращивания стальной канат подлежит браковке при наличии волнистости с соотношением

$$d_b/d > 1,33.$$

Волнистость - вид деформации стального каната, при которой его продольная ось принимает форму винтовой спирали с шагом H_b и диаметром d_b .

5. Заключение

Наиболее опасной является волнистость, направление спирали которой совпадает с направлением свивки стального каната, при этом шаги спирали волнистости H_b и свивки H одинаковы. Стальной канат на участке сращивания в поперечном сечении узлов теряет геометрическую симметрию. В поперечном сечении узлов находятся семь прядей, одна из которых замещает сердцевину. В поперечном сечении узла, пряди стального каната нагружаются неодинаково: перегружаются пряди, не имеющие разрывов, и недогружается одна из прядей, замещаемая другой.

Список литературы

1. Короткий, А.А. Счалка стального каната, проблемы и пути их решения / А.А. Короткий, А.В. Панфилов, Э.В. Марченко // Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы: Материалы VIII Междунар. молодежной научн. конф., Саратов, 3-5 ноября 2018 г. Саратов: Саратовский государственный технический университет,

References

1. Korotkiy A.A., Panfilov A.V., Marchenko E.V. Steel wire rope, problems and solutions. *Nanomaterialy i nanotekhnologii: problema i perspektivy: sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii, Saratov, 3-5 noyabrya 2018 g. Saratov, Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet*, 2018, p. 168-173 (In Russian)

2018. - С.168-173.

2. Короткий, А.А. Технические причины обрывов проволок несущего каната на пассажирской подвесной канатной дороге / А.А. Короткий, Э.В. Марченко, А.В. Панфилов // Безопасность техногенных и природных систем. 2017. - № 1. - 8 с. - URL: <http://bps-journal.ru/>.

3. Короткий, А.А. Стойкость несущего каната пассажирской подвесной канатной дороги / А.А. Короткий, Э.В. Марченко, А.В. Панфилов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. - № 2.

4. Лагереv, И.А. Моделирование динамики пассажирской кабины транспортной системы «Канатное метро» / И.А. Лагереv, А.В. Лагереv, А.В. Панфилов, Э.В. Марченко // Вестник Донского государственного технического университета. - 2018. - Т. 18. - № 1. – С. 16-21. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-1-16-21

5. Логвинов, А.С. Пассажирские одноканатные дороги. Устройство и эксплуатация / А.С. Логвинов, А.А. Короткий. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2016. - 210 с.

6. Марченко, Э.В. Метод нанесения твердосмазочных материалов на стальной канат в процессе его производства / Э.В. Марченко, С.И. Попов, Ю.В. Марченко, Н.С. Донцов // Виброволновые процессы в технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий: труды междунар. научн. симпозиума технологов-машинистроителей, 3-6 октября. - Ростов н/Д, 2017. - С. 131-134.

7. EN 12927-7:2005 Подвесные канатные дороги для транспортировки людей. Требования безопасности. Канаты. Часть 7. Проверка, ремонт и технический уход.

8. EN 12385-8 Канаты стальные. Безопасность. Часть 8. Несущие и тяговые канаты из прядей для пассажирской канатной дороги.

9. Глушко, М.Ф. Стальные подъемные канаты / М.Ф. Глушко. - Киев: Техника, 1966. - 327с.

2. Korotkiy A.A., Marchenko E.V., Panfilov A.V. Technical causes of wire-carrying-traction rope on a passenger cableway. *Bezopasnost tekhnogennykh i prirodnykh system*, 2017, No.1, pp. 8.

Available: <http://bps-journal.ru/> (In Russian)

3. Korotkiy A.A., Marchenko E.V., Panfilov A.V. Persistence of a towing rope of a passenger aerial ropeway. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskkiye nauki*, 2018. No.2 (In Russian)

4. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Panfilov A.V., Marchenko E.V., Modeling the dynamics of the passenger cabin of the ropeway metro system. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, Vol. 18, No.1, pp. 16-21 DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-1-16-21 (In Russian)

5. Logvinov A.S., Korotkiy A.A. *Passazhirskie odnokanatnyye dorogi. Ustroystvo i ekspluatatsiya* [Passenger one-cable roads. Device and operation]. Rostov-on-Don, Izdatelskiy Tsentr DGTU, 2016. 210 p. (In Russian)

6. Marchenko E.V., Popov S.I., Marchenko Yu.V., Dontsov N.S. Method of applying solid lubricants on a steel rope in the process of its production. *Vibrovolyvnyye protsessy v tekhnologii obrabotki detaley vysokotekhnologichnykh izdeliy: Sbornik trudov mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma tekhnologov-mashinostroyiteley, 3-6 oktyabrya*. Rostov-on-Don, 2017, pp. 131-134 (In Russian)

7. EN 12927-7: 2005 Aerial cableways for transporting people. Safety requirements. Ropes Part 7. Inspection, repair and maintenance.

8. EN 12385-8 Steel ropes. Security. Part 8. Bearing and traction ropes of strands for passenger cable road.

9. Glushko M.F. *Stalnyye podemnyye kanaty* [Steel lifting channels]. Kiev, Tekhnika, 1966. 327 p. (In Russian)