

УДК 621.778.5:677.721

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРОВОЛОК В МНОГОСЛОЙНОЙ ПРЯДИ ПРИ КРУГОВОМ КАЛИБРУЮЩЕМ ОБЖАТИИ

Харитонов В.А., к.т.н., профессор кафедры технологий обработки материалов
Иванцов А.Б., к.т.н., доцент кафедры металлургии и стандартизации (art.belor@yandex.ru)
Лантева Т.А., к.т.н., старший преподаватель кафедры метизного производства
и электроэнергетики

Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова
(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Аннотация. Выявлен и обоснован механизм пластического обжатия пряди, как процесс образования арок: прочного свода проволок, появление каждого из которых приводит к смене напряженного состояния пряди на этапах обжатия. Установлено, что до появления первой арки наиболее приоритетными деформированию, при исходном отсутствии боковых контактов, являются проволоки внешнего слоя и центральная проволока. После появления каждой арки напряжения в проволоках арочного слоя становятся преимущественно сжимающими, что временно, вплоть до образования арок во всех других слоях пряди, не позволяет данному слою активно деформироваться. После формирования всех арок проволоки верхнего слоя снова становятся наиболее приоритетными деформированию. Центральная проволока пряди перенапряжена по отношению ко всем иным на всех этапах обжатия. Разработанная методика позволяет анализировать степень проработки каждой проволоки пряди при определенной величине обжатия, отображает особенности деформации многослойной пряди: резкий рост ширины вновь появившегося контакта при почти неизменной величине обжатия; образование арок; одновременное появление новых контактов в слоях пряди, обусловленное ее геометрией и направлением смещения проволок. Применение предложенной методики позволяет проектировать рациональные конструкции прядей и канатов, подвергаемых малому и среднему круговому пластическому обжатию, а также определять необходимую величину обжатия пряди и канатов конкретной конструкции, исходя из условий сохранения гибкости каната и формирования требуемой геометрии контакта проволок. Установлено, что для пряди диаметром 7,68 мм конструкции 1 + 5 + 5/5 + 10 наиболее равномерная ее проработка и развитость контактов обеспечивается при обжатиях в диапазоне $3,74 < Q < 7,06$ %. Интенсивное заполнение зазоров в пряди начинается при $Q = 7,06$ %, что определяет последующую деформацию как предельную для канатов, работающих на изгиб, как по эксплуатационным характеристикам, так и по условиям работы круглого калибра роликовой волоки.

Ключевые слова: многослойная прядь, арочный слой, проволока, межпроволочный контакт, калибрующее обжатие, деформация, напряжение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-9-691-697

Стальной канат – витое изделие, состоящее из большого количества проволок, работающих самостоятельно [1]. Начиная с середины прошлого века к технологии производства стальных круглопроволочных канатов, включающей свивку и силовую обработку проволоки, прядей и каната в целом (рихтовка, преформация, механико-термическая обработка и пр.), добавляется операция глубокого радиального пластического обжатия прядей, выполняемая способами волочения, обкатки, прокатки, или, что реже, ротационной ковкой [2 – 5]. Малое пластическое обжатие прядей обеспечивает контролируемое уплотнение свивки с получением конечного изделия высокой точности по диаметру, формированием межпроволочного полосового контакта, нейтрализацией свивочных напряжений.

Наибольшее распространение получил способ пластической деформации пряди в монолитной волоке. Использование данного инструмента позволяет производить глубокое деформирование прядей с коэффициентом заполнения сечения больше или равным единицы. Однако глубокое обжатие устраняет межпроволочный

зазор, ограничивая способность пряди к изгибу, увеличивает силу трения между контактирующими проволоками, усложняет их взаимное проскальзывание, уменьшает количество смазки в сокращающемся межпроволочном пространстве, что снижает эксплуатационную стойкость канатов из пластически обжатых прядей.

В конце XX в. руководителем Одесского научно-исследовательского отделения стальных канатов В.А. Малиновским предложен метод калибрующего обжатия, при котором одновременно формируются равномерное напряженное состояние прядей, благоприятная форма контакта проволок, высокая точность геометрии и плотная структура прядей с сохранением межпроволочного зазора [1].

Применению этого способа сегодня способствует наличие промышленно изготавливаемых роликовых волок, обеспечивающих возможность реализации режимов калибрующего обжатия и простую их установку на действующих канатных машинах.

В настоящее время проводятся исследования процесса калибрующего обжатия, связанные с поиском

рациональной степени деформации пряди в зависимости от условий эксплуатации каната [6 – 12], анализом напряженно-деформированного состояния прядей, оценкой и прогнозом эксплуатационных характеристик каната, в том числе с применением программного моделирования [13 – 21].

Оценка процесса обжатия пряди предполагает расчет энергосиловых параметров, в частности, передаваемого внутрь пряди давления (полного и удельного). Данный вопрос достаточно широко изучен в работах [22] (для процесса волочения пряди) и [23] (для процесса протяжки пряди в роликовых волокнах). Однако эти методики расчета не учитывают давление, передаваемое в тангенциальном направлении, изменение угла наклона контактных площадок при деформации, смещение контактных площадок и оказываются неприменимы для анализа промежуточных этапов формоизменения проволок при малых и средних обжатиях (коэффициент заполнения сечения пряди меньше 1,0). В связи с этим необходимо создание методики, позволяющей учитывать диапазон степеней обжатия, конструкцию пряди, расположение проволок в конкретном слое и др.

Целью данной работы является определение закономерностей протекания пластической деформации проволок в многослойной пряди при круговом калибрующем обжатии.

Реализация механизма рассмотрена на примере деформации многослойной пряди диаметром 7,68 мм конструкции 1 + 5 + 5/5 + 10 в сдвоенной трехроликовой волоке. Диаметры проволок по слоям пряди приведены ниже (в числителе указан номер слоя проволок в пряди, считая от центра; в знаменателе приведены диаметры проволок; проволоки диаметром 0,95 мм и 1,2 мм тех-

нологически относятся к одному слою, однако для удобства расчетов они выделены в два отдельных слоя):

$$\frac{1}{0,85} + \frac{2}{1,00} + \frac{3}{0,95} + \frac{4}{1,20} + \frac{5}{1,70}.$$

Данная прядь предназначена для дальнейшего пластического обжатия, поэтому у проволок слоев конструктивно заложено отсутствие боковых контактов в тангенциальном направлении, что определяет минимальное количество контактов и облегчает глубокую проработку пряди.

С применением программы Компас-3D в программном комплексе Deform осуществлено моделирование [20] процесса обжатия пряди конструкции 1 + 5 + 5/5 + 10 в трехроликовой волоке (рис. 1).

При обжатии пряди (рис. 1, а) на определенном этапе сближения проволок слоев происходит образование дополнительных боковых контактов (рис. 1, б) с получением из каждого слоя проволок свода в виде круговой замыкающейся на себя арочной конструкции.

Круговое обжатие в роликовой волоке формирует сжимающие усилия на всех контактах проволок пряди, что при образовании дополнительных контактов смещает картину напряжений в сечении проволоки к сжимающей «схеме главных нормальных напряжений».

До образования первого дополнительного контакта в слоях проволок наиболее нагруженной является центральная проволока (рис. 1, а). Всестороннее сжатие пятью контактами центральной проволоки повышает в сечении величину σ_i , что препятствует ее дальнейшей активной деформации до образования арок в других слоях пряди (рис. 1, б) с соответствующим возрастанием в их сечениях σ_i .

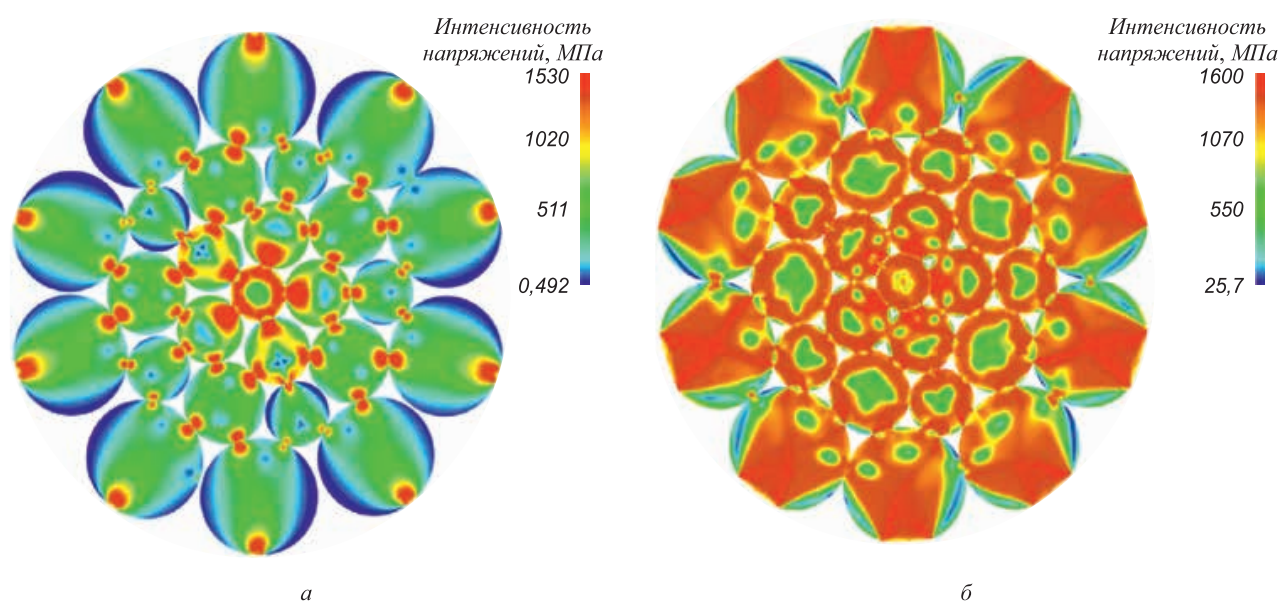


Рис. 1. Распределение интенсивности напряжений σ_i по слоям проволок пряди 1 ÷ 5 в начале (а) и в конце (б) обжатия

Fig. 1. Distribution of the stress intensity σ_i “Stress effective” on the layers of wire strands 1 ÷ 5 at the beginning (а) and at the end (б) of crimping

С применением уточненной методики расчета передачи давления внутрь пряди, с учетом ширины контакта проволок [24] и тангенциальной доли давления [25] при обжатии с коэффициентом заполнения сечения менее единицы, проведены расчеты радиального обжатия проволок и изменение ширины их контактных площадок. На основе расчетов получена диаграмма, отображающая механизм деформации пряди (рис. 2).

На рис. 2 кривая OK , соответствующая суммарной ширине контактной поверхности проволок верхнего слоя пряди, имеет продолжение в точках E (0,0761; 4,26) и Q (0,0955; 5,33).

Местный перегиб какой-либо кривой (например, точка B на рис. 2) соответствует образованию у проволоки новых контактов, что вызывает интенсивный рост ширины контактной поверхности проволоки при почти неизменной величине обжатия. Наличие двойного перегиба (подъема), который наиболее явно наблюдается на кривой изменения суммарной ширины контакта проволоки диаметром 1,70 мм (точки A и A_1 на рис. 2), определяется несимметричностью боковых контактов, неодновременностью их образования и кручением проволок.

Каждая «изолиния» (линия равного уровня) (см. рис. 2) представляет собой кривую зависимости суммарной ширины контактной поверхности отдельной проволоки от величины радиального обжатия пряди в данном слое проволок. Поэтому сумма значений координат всех точек, лежащих на «изолинии», проецированных на ось абсцисс, соответствует радиальному обжатю пряди в данный момент.

Форма кривой изолинии определяется приоритетностью деформации определенного слоя проволок по отношению к другим проволокам пряди, принципиально меняющейся при образовании новой арки. Характер изолинии в промежутке между образованием арок принципиально не меняется и подобен предшествующей форме, показанной на рис. 2. Заметим, что при постепенном заполнении межпроволочных пустот, интенсивность развития контактов в определенном слое начинает снижаться, несмотря на имеющуюся в нем приоритетность деформации. Это явление характерно, например, для центральной проволоки при обжатии $Q \leq 1,51$ %, несмотря на отсутствие боковых контактов проволок в верхних слоях пряди.

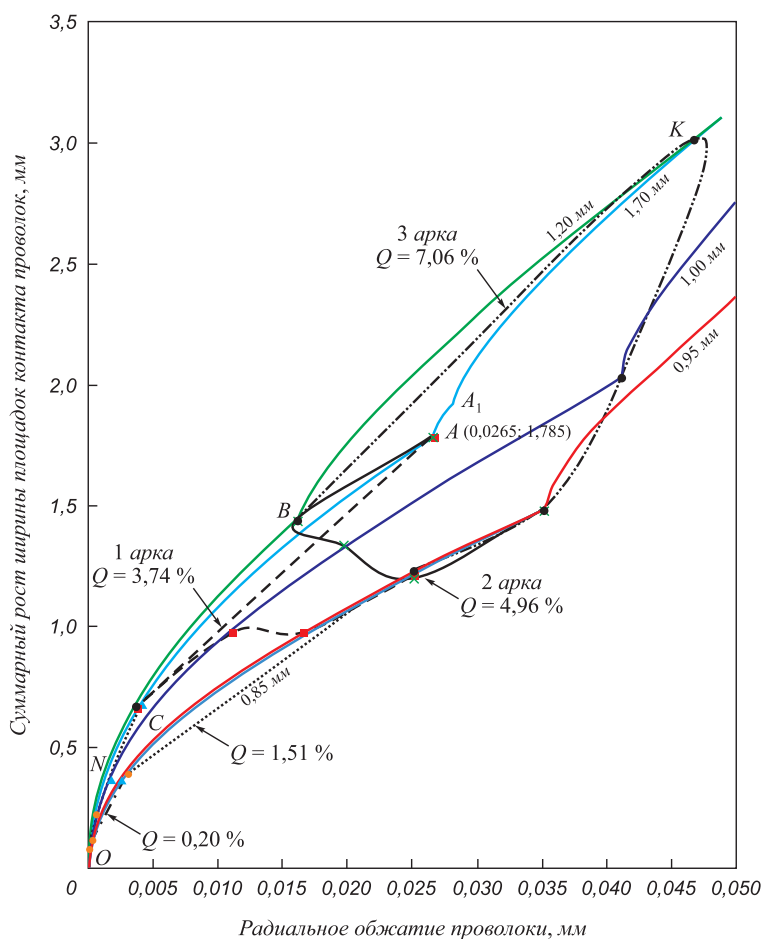


Рис. 2. Изолинии величин суммарной ширины контактов проволок в переходные стадии деформации и моменты формирования первой и второй арок

Fig. 2. Isolines of the values total width of the wire's contacts in transitional stages of deformation and at the moments of formation of the first and second arches

По данным диаграммы построено два графика, показывающих послойное изменение суммарной ширины межпроволочного контакта (рис. 3) и радиальное смещение проволок к центру пряди (рис. 4).

На рис. 3 и 4 цифрами от 2 до 5 отмечены характерные этапы деформации:

- 2а – снижение интенсивности роста ширины контактной поверхности центральной проволоки ($Q = 1,51\%$);
- 2б – образование арки во внешнем слое пряди ($Q = 3,74\%$);
- 3 – образование арок проволоками четвертого и третьего слоев ($Q = 4,96\%$);
- 4а – образование арки проволоками второго слоя ($Q = 7,06\%$);
- 4б – продолжение активной деформации всего сечения пряди ($Q = 11,01\%$);
- 5 – снижение интенсивности заполнения межпроволочных зазоров, начало объемной деформации пряди ($Q = 13,93\%$).

Анализ представленных графиков показывает, что первоначально при отсутствии боковых контактов проволок деформация пряди протекает по схеме осадки. Появление арки в каком-либо слое пряди блокирует деформацию проволок данного слоя до момента образования арок в других слоях пряди. На основе выявленного характера течения металла, процесс пластического обжатия пряди можно разделить на пять этапов, отличающихся особенностями формирования площадок и, соответственно, формами «изолиний», фиксирующих суммарную ширину всех площадок контакта каждой проволоки пряди при определенной степени деформации.

Первый этап деформации описывается участком кривой *ON* (см. рис. 2, $Q \leq 0,20\%$). Для этого этапа характерна изолиния в зоне пластических деформаций,

близкая к вертикальной. Формы кривых для всех проволок пряди на участке *ON* аналогичны. Данный этап деформации частично реализуется уже в обжимных плашках и в первом (калибрующем) проходе роликовой волоки. На начальном этапе деформации можно принять, что контакты между проволоками точечные. С увеличением обжатия все слои пряди активно деформируются, что приводит к резкому увеличению ширины межпроволочного контакта. Деформация по сечению пряди здесь практически равномерна, вне зависимости от размера и положения проволок.

Второй этап обжатия протекает с более интенсивным контактообразованием во внешнем и центральном слоях пряди, описывается участком кривой *NSA* (см. рис. 2) и диаграммами 2а, 2б (см. рис. 3 и 4) при $0,20 < Q \leq 4,96\%$. При наличии боковых контактов у проволок исходной пряди изолиния принимает форму наклоненной вперед кривой, определяющей преимущественную проработку внешних проволок. Этап отличается значительной неравномерностью деформации по сечению пряди. При интенсивном развитии площадок контакта центральной проволоки, определяемом отсутствием на данном этапе боковых контактов во всех вышележащих слоях, происходит быстрое заполнение межпроволочного зазора с проволоками второго слоя. При степени относительного обжатия $Q = 1,51\%$ рост контактных площадок центральной проволоки замедляется (см. рис. 4, диаграммы 2а и 3б) и в последующем будут изменяться только форма и кривизна контакта. Прекращение деформации пряди на данном этапе обжатия нецелесообразно в связи с наличием неблагоприятного напряженного состояния (пониженного уровня σ_i) в сечении проволок второго, третьего и четвертого слоев [20].

Третий этап деформации описывается участком кривой *AK* (см. рис. 2) ($4,96 < Q \leq 7,06\%$) и диаграм-

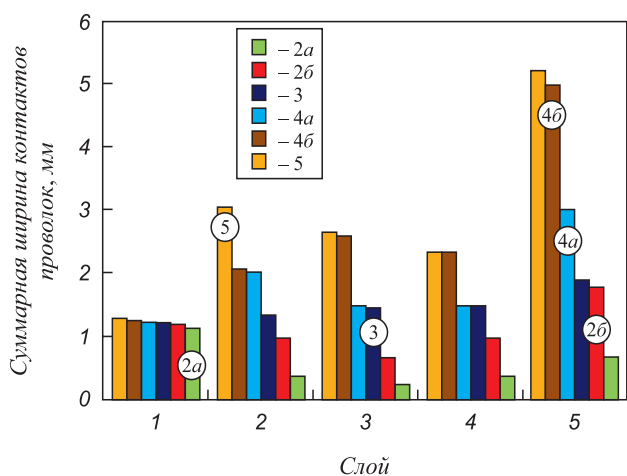


Рис. 3. Изменение суммарной ширины межпроволочного контакта по слоям пряди при обжатии

Fig. 3. Change in total width of the interwire contact of strands during crimping

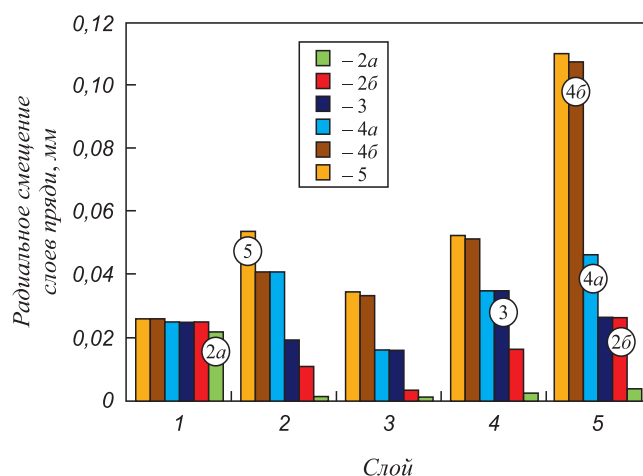


Рис. 4. Радиальное смещение слоев проволок к центру пряди при обжатии

Fig. 4. Radial displacement of wires layers to the center of the strand during crimping

мами 3 (см. рис. 3, 4) и ограничивается появлением первой и последней арок. Для этапа характерна интенсивно и неравномерно меняющаяся по форме изолиния (см. рис. 2). Изолиния $Q = 3,74\%$ соединяет точки на кривых в момент образования арки в первом слое. Точка $A(0,0265; 1,785)$ соответствует условию образования первого контакта (первой арки) с последующим интенсивным ростом суммарной ширины контактов в пятом слое. Из-за изменения схемы главных нормальных напряжений в сторону всестороннего сжатия, проработка внешнего слоя пряди почти прекращается до реализации приоритета деформации в остальных слоях при достижении относительного обжатия $Q = 5,50\%$ (см. рис. 2).

Развитие контактной поверхности проволок внутренних слоев при $Q = 4,96\%$ (см. см. рис. 2) формирует арки между проволоками в четвертом и третьем слоях (см. рис. 3 и 4, диаграммы 3) еще до реализации деформации во внутренних слоях пряди. Таким образом, происходит приостановка интенсивной проработки уже трех внешних слоев пряди.

При $Q = 7,06\%$ (см. рис. 2) происходит образование последней арки во втором слое, что замедляет развитие контактной поверхности в данном слое. Одновременно проработка происходит в третьем – пятом слоях до реализации в них приоритета деформации при $Q = 11,01\%$.

Таким образом, формирование каждой арки временно блокирует активное развитие данного слоя до реализации деформации в других слоях пряди. По мере образования новых контактов деформация по сечению пряди распределяется все более равномерно.

Четвертый этап деформации начинается после образования арок во всех слоях пряди и описывается участком кривой KE (см. рис. 2) ($7,06 < Q \leq 13,93\%$) и диаграммами 4а и 4б (см. рис. 3 и 4). Для этого этапа характерно пересечение изолинией аналогичных участков кривых, что определяет монотонно убывающую по сечению пряди величину деформации. Деформация всех контактов проволок на данном этапе протекает до степени полного заполнения межпроволочных пустот, когда уже становится приоритетной деформация удлинения.

При обжатии $Q = 7,06\%$ межпроволочные зазоры четвертого слоя заполнены в среднем на 58 %, третьего – на 41 %, второго – на 56 % при критическом уровне заполнения 70 ÷ 75 % (переход к деформации удлинения пряди). При достижении стадии реализации приоритета деформации проволоками третьего – пятого слоев, при обжатии $Q = 11,01\%$ (см. рис. 3 и 4, диаграммы 4б) и начале деформации всех проволок пряди (за исключением центральной) достаточно прорабатываются только проволоки внешнего и второго слоев. Так, межпроволочные пустоты вокруг проволок пятого слоя заполнены в среднем уже на 60 %, второго – на 56 %, зазоры третьего и четвертого слоев заполнены на 86 %.

Пятый этап является верхней границей малых деформаций пряди и описывается участком кривой EQ (см. рис. 2) ($Q \geq 13,93\%$) и диаграммами 5 (см. рис. 3 и 4). По причине почти заверщенного заполнения межпроволочных пустот деформация преимущественно плоской переходит в объемную. Далее характер деформации пряди по слоям уже не претерпевает принципиальных изменений. Прядь начинает деформироваться как монолит, что определяет переход к средним и глубоким обжатиям.

Из рис. 2 видно, что наиболее равномерная проработка пряди данной конструкции и развитость контактов обеспечивается при обжатиях в диапазоне $3,74 < Q < 7,06\%$. При меньшей степени деформации слабо проработаны центральные слои, при больших деформациях обжатие получает в основном внешний слой и, в меньшей степени, второй слой.

Данные расчета выявили последовательный порядок образования арок для данной конструкции пряди, начиная с верхнего слоя вглубь пряди. Этап образования арок для рассмотренной пряди происходил в достаточно узком диапазоне $3,74 < Q < 7,06\%$, что было обеспечено сближением проволок в каждом слое до начала бокового контактообразования.

Интенсивное заполнение зазоров в пряди начинается при $Q = 7,06\%$, что определяет последующую деформацию как предельную для канатов, работающих на изгиб, как по эксплуатационным характеристикам, так и по условиям работы круглого калибра роликковой волоки.

Выводы. Выявлен и обоснован механизм пластического обжатия пряди, представляющий собой многоэтапный процесс формирования замыкающихся на себя арочных сводов – несущих проволочных слоев, где образование каждого нового замкнутого контура проволок на этапах обжатия последовательно изменяет распределение напряженного состояния по радиусу пряди.

При условии изначального отсутствия боковых межпроволочных контактов в слоях пряди приоритетной является деформация центральной проволоки и внешнего повива, вплоть до образования первого арочного слоя. Во вновь образованных арочных слоях пряди, по причине увеличения количества контактов, формируются преимущественно сжимающие напряжения, что препятствует активной деформации проволок данного слоя, вплоть до окончания процесса смыкания арочных слоев всей пряди. При завершении процесса образования всех арочных слоев, верхний повив для деформирования вновь определяется как наиболее приоритетный. Относительно проволок, составляющих слои пряди, центральная проволока по параметру σ_i перенапряжена на всех этапах обжатия.

Разработана методика, позволяющая анализировать степень проработки каждой проволоки пряди при определенной величине обжатия. Методика выявляет особенности формоизменения проволок пряди: быстрое

увеличение ширины вновь образовавшегося межпроволочного контакта при незначительной пластической деформации; последующее формирование арочных сводов; возможность одновременного образования новых контактов между проволоками в одном слое, определяемое геометрией контакта с инструментом, конструкцией каната и вектором смещения центров проволок.

Применение предложенной методики позволяет проектировать рациональные конструкции прядей и канатов, подвергаемых малому и среднему круговому пластическому обжатию, а также определять необходимую величину обжатия пряди и канатов конкретной конструкции, исходя из условий сохранения гибкости каната и формирования требуемой геометрии контакта проволок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малиновский В.А. Стальные канаты. Ч. 1. – Одесса: Астропринт, 2001. – 188 с.
2. Wehking K., Ziegler S. Berechnung eines einfachen Seils mit FEM // Draht Magazine. 2003. No. 5. P. 32 – 36.
3. Haritonov V.A., Zaretsky L.M. Rolling for the production of plastically strained ropes and strands // Eurowire Magazine. 2004. No. 1. P. 100 – 101.
4. Пышняк О.А., Чаюн И.М. Влияние технологических напряжений на граничные состояния каната // Стальные канаты: Сб. науч. тр. Вып. 8. – Одесса: Астропринт, 2010. С. 120 – 126.
5. Чаюн И.М., Пышняк О.А., Непомнящий А.В. Предварительное деформированное состояние спиральных канатов // Стальные канаты: Сб. науч. тр. Вып. 8. – Одесса: Астропринт, 2013. С. 141 – 155.
6. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Выбор режимов деформации при обжатии многослойных канатов в трехроликовых волоках // Производство проката. 2013. № 8. С. 18 – 25.
7. Даненко В.Ф., Гуревич Л.М., Шаталин С.Ю., Кишечникова И.С. Повышение физико-механических и служебных свойств пластически обжатых стальных прядей и изготовленных из них канатов // Изв. ВолГТУ. 2015. № 8. С. 72 – 76.
8. Гуревич Л.М., Даненко В.Ф. Оптимизация параметров пластического обжатия стальных канатов с целью повышения физико-механических и служебных свойств // Изв. ВолГТУ. 2016. № 2. С. 78 – 83.
9. Даненко В.Ф., Гуревич Л.М. Влияние кругового пластического обжатия на напряженно-деформированное состояние стального каната одинарной свивки // Сталь. 2016. № 12. С. 58 – 62.
10. Даненко В.Ф., Гуревич Л.М., Кушкина Е.Ю., Гладских Э.Б. О расширении области применения пластически обжатых спиральных прядей и изготовленных из них канатов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 11. С. 764 – 772.
11. Zhang Min, Kou Zi-ming. Duo chuan xin gangsi sheng yingli yingbian fenbu yanjiu // Meitan jishu = Coal Technol. 2016. Vol. 35. No. 1. P. 255 – 258.
12. Скалацкий В.К., Емельянов В.Г. Определение оптимальных условий процесса пластического обжатия прядей // Стальные канаты: Сб. науч. тр. Вып. 8. – Киев: Техника, 1971. С. 104 – 113.
13. Чаюн И.М., Чаюн М.И. Метод конечных элементов в исследовании деформированного и напряженного состояния канатов // Стальные канаты: Сб. науч. тр. Вып. 2. – Одесса: Астропринт, 2001. С. 24 – 34.
14. Vilceanu Lucia, Babeu Tiberiu Dimitrie, Ghita Eugen. Численный анализ срока службы проволочных канатов методом конечных элементов // Стальные канаты: Сб. науч. тр. Вып. 3. – Одесса: Астропринт, 2003. С. 95 – 100.
15. Патарая Д., Нозадзе Г. и др. Компьютерное моделирование и расчет канатной системы кольцевых канатных дорог // Стальные канаты: Сб. науч. тр. Вып. 7. – Одесса: Астропринт, 2009. С. 153 – 161.
16. Патарая Д., Нозадзе Г. О моделировании передачи усилия в системе приводной шкив – канат // Стальные канаты: Сб. науч. тр. Вып. 7. – Одесса: Астропринт, 2009. С. 217 – 222.
17. Даненко В.Ф., Гуревич Л.М., Проничев Д.В., Трунов М.Д. Компьютерное моделирование при проектировании процесса кругового обжатия грозозащитного троса с оптическим модулем // Изв. ВолГТУ. 2015. № 8. С. 97 – 102.
18. Ren Zhiqian, Yu Zongyue, Chen Xun. Model for taking into account the effect of elastoplastic damages on the strength of a wire rope // Jixie gongcheng xuebao = J. Mech. Eng. 2017. 53. No. 1. P. 121 – 129.
19. Jiao Ai-sheng, Liu Li-mei, Yan Hui-ping. Modeling the choice of parameters of steel ropes Warrington // Meikuang jixie = Coal Mine Mach. 2016. Vol. 37. No. 1. P. 236 – 238.
20. Харитонов В.А., Иванцов А.Б., Лаптева Т.А. Моделирование напряженного состояния пряди при калибрующем обжатии в роликовой волоке // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2016. № 9. С. 90 – 94.
21. Малиновский В.А. Стальные канаты. Ч. 2. – Одесса: Астропринт, 2002. – 180 с.
22. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. – Киев: Техника, 1966. – 328 с.
23. Бирюков Б.А. Исследование и разработка технологии пластического деформирования проволочных прядей в роликовой волоке: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 1974. – 20 с.
24. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Методика определения контактных площадок при малом обжатии прядей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 4. С. 66 – 67.
25. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Расчет распределения деформаций по сечению пряди при круговом обжатии // Вестник МГТУ им. Носова. 2012. № 4. С. 47 – 51.

Поступила в редакцию 9 июля 2018 г.

После доработки 15 августа 2019 г.

Принята к публикации 2 сентября 2019 г.

REGULARITIES OF DISTRIBUTION OF WIRE DEFORMATION IN MULTILAYERED STRAND AT CIRCULAR CALIBRATION COMPRESSION

V.A. Kharitonov, A.B. Ivantsov, T.A. Lapteva

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The mechanism of plastic crimping of the strand has been identified and justified, as the process of formation of arches: a strong arch

of wires, the appearance of each leads to a change in stressed state of the strand at reduction stages. It was established that before appearance of the first arch, wires of the outer layer and the central wire are the most priority to deformation, with the initial absence of side contacts. After appearance of each arch, stresses in wires of the arch layer become predominantly compressive, which temporarily prevents the given layer from actively deforming, up to the formation of arches in

all other layers of the strand. After formation of all arches, wires of the upper layer again become the most priority to deformation. Central wire of the strand is overstrained in relation to all other wire strands at all stages of compression. The developed technique allows analyzing the degree of working out of each wire of a lock at a certain amount of reduction. It reflects the features of a multilayered strand deformation: sharp increase in width of the newly appeared contact at almost constant reduction; arches formation; non-simultaneous occurrence of new contacts in layers of strands due to the geometry of the strand and direction of the wires displacement. Application of the proposed technique allows to make rational designs of strands and ropes subjected to small and medium circular plastic crimping, as well as to determine the necessary amount of compression of strands and ropes of a particular design, proceeding from the conditions for retaining the flexibility of the rope and forming the required contact geometry of the wires. It was found that for strands with a diameter of 7.68 mm in the construction of 1 + 5 + 5/5 + 10, the most uniform development of the strand and the contacts is ensured during the reduction in the range of $3.74 < Q < 7.06$ %. Intensive filling of the gaps in the strand begins at $Q = 7.06$ %, which determines the subsequent deformation as the limiting for the ropes working on bending both for performance characteristics and for the conditions of operation of the round caliber of a roller die.

Keywords: multilayer strand, arched layer, wire, interwire contact, calibrating compression, deformation, stress.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-9-691-697

REFERENCES

1. Malinovskii V.A. *Stal'nye kanaty. Ch. 1* [Steel ropes. Part 1]. Odessa: Astroprint, 2001, 188 p. (In Russ.).
2. Wehking K., Ziegler S. Berechnung eines einfachen Seils mit FEM. *Draht Magazine*. 2003, no. 5, pp. 32–36.
3. Haritonov V.A., Zaretsky L.M. Rolling for the production of plastically strained ropes and strands. *Eurowire Magazine*. 2004, no. 1, pp. 100–101.
4. Pyshnyak O.A., Chayun I.M. Influence of technological stresses on boundary conditions of the rope. In: *Stal'nye kanaty: sb. nauch. tr. Vyp. 8* [Steel ropes: coll. of sci. papers. Issue 8]. Odessa: Astroprint, 2010, pp. 120–126. (In Russ.).
5. Chayun I.M., Pyshnyak O.A., Nepomnyashchii A.V. Preliminary deformed state of spiral ropes. In: *Stal'nye kanaty: sb. nauch. tr. Vyp. 8* [Steel ropes: coll. of sci. papers. Issue 8]. Odessa: Astroprint, 2013, pp. 141–155. (In Russ.).
6. Kharitonov V.A., Lapteva T.A. Choice of deformation modes during crimping of multilayer ropes in three-roll drawing dies. *Proizvodstvo prokata*. 2013, no. 8, pp. 18–25. (In Russ.).
7. Danenko V.F., Gurevich L.M., Shatalin S.Yu., Kischechnikova I.S. Increase of physico-mechanical and service properties of plastically crimped steel strands and ropes made of them. *Izv. VolGTU*. 2015, no. 8, pp. 72–76. (In Russ.).
8. Gurevich L.M., Danenko V.F. Optimization of the parameters of plastic crimping of steel ropes for the purpose of increasing the physico-mechanical and service properties. *Izv. VolGTU*. 2016, no. 2, pp. 78–83. (In Russ.).
9. Danenko V.F., Gurevich L.M. Effect of circular plastic crimping on the stress-strain state of a single rope steel rope. *Stal'*. 2016, no. 12, pp. 58–62. (In Russ.).
10. Danenko V.F., Gurevich L.M., Kushkina E.Yu., Gladskikh E.B. Extension of the scope of steel compacted strands and ropes made of them. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 11, pp. 764–772. (In Russ.).
11. Zhang Min, Kou Zi-ming. Duo chuan xin gangsi sheng yingli yingbian fenbu yanjiu. *Meitan jishu = Coal Technol.* 2016, vol. 35, no. 1, pp. 255–258. (In Chin.).
12. Skalatskii V.K., Emel'yanov V.G. Determination of optimal conditions for the process of plastic crimping of strands. In: *Stal'nye kanaty: sb. nauch. tr. Vyp. 8* [Steel ropes: coll. of sci. papers. Issue 8]. Kiev: Tekhnika, 1971, pp. 104–113. (In Russ.).
13. Chayun I.M., Chayun M.I. Method of finite elements in the study of deformed and stressed state of ropes. In: *Stal'nye kanaty: sb. nauch. tr. Vyp. 2* [Steel ropes: sb. sci. pap. Issue 2]. Odessa: AstroPrint, 2001, pp. 24–34. (In Russ.).
14. Vilceanu Lucia, Babeu Tiberiu Dimitrie, Ghita Eugen. Numerical analysis of calculation of wire ropes lifetime by the finite element method. In: *Stal'nye kanaty: sb. nauch. tr. Vyp. 3* [Steel ropes: coll. of sci. papers. Issue 3]. Odessa: AstroPrint, 2003, pp. 95–100. (In Russ.).
15. Pataraya D., Nozadze G. etc. Computer modeling and calculation of the cable system of ring cableways. In: *Stal'nye kanaty: sb. nauch. tr. Vyp. 7* [Steel ropes: coll. of sci. papers. Issue 7]. Odessa: AstroPrint, 2009, pp. 153–161. (In Russ.).
16. Pataraya D., Nozadze G. On simulation of force transfer in the drive pulley-rope system. In: *Stal'nye kanaty: sb. nauch. tr. Vyp. 7* [Steel ropes: coll. of sci. papers. Issue 7]. Odessa: AstroPrint, 2009, pp. 217–222. (In Russ.).
17. Danenko V.F., Gurevich L.M., Pronichev D.V., Trunov M.D. Computer simulation in designing the process of circular reduction of a lightning-proof cable with an optical module. *Izv. VolGTU*. 2015, no. 8, pp. 97–102. (In Russ.).
18. Ren Zhiqian, Yu Zongyue, Chen Xun. Model for taking into account the effect of elastoplastic damages on the strength of a wire rope. *Jixie gongcheng xuebao = J. Mech. Eng.* 2017, vol. 53, no. 1, pp. 121–129.
19. Jiao Ai-sheng, Liu Li-mei, Yan Hui-ping. Modeling the choice of parameters of steel ropes Warrington. *Meikuang jixie = Coal Mine Mach.* 2016, vol. 37, no. 1, pp. 236–238.
20. Kharitonov V.A., Ivantsov A.B., Lapteva T.A. Modeling the stressed state of the strand with a calibrated reduction in a roller die. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2016, no. 9, pp. 90–94. (In Russ.).
21. Malinovskii V.A. *Stal'nye kanaty. Ch. 2* [Steel ropes. Part 2]. Odessa: Astroprint, 2002, 180 p. (In Russ.).
22. Glushko M.F. *Stal'nye pod'emnye kanaty* [Steel hoisting ropes]. Kiev: Tekhnika, 1966, 328 p. (In Russ.).
23. Biryukov B.A. *Issledovanie i razrabotka tekhnologii plasticheskogo deformirovaniya provolochnykh pryadei v rolikovoi voloke: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research and development of the technology of plastic deformation of wire strands in a roller die: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Magnitogorsk, 1974, 20 p. (In Russ.).
24. Kharitonov V.A., Lapteva T.A. The methods of determining the width of wires contact with small strands reduction. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 4, pp. 66–67. (In Russ.).
25. Kharitonov V.A., Lapteva T.A. Calculation of the distribution of deformations along the cross section of a strand under circular compression. *Vestnik MGTU im. Nosova*. 2012, no. 4, pp. 47–51. (In Russ.).

Information about the authors:

V.A. Kharitonov, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Materials Processing Technologies"

A.B. Ivantsov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy and Standardization" (art.belor@yandex.ru)

T.A. Lapteva, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Hardware Production and Electrical Energy Industry

Received July 9, 2018

Revised August 15, 2019

Accepted September 2, 2019