

## ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.778:519.876.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-6-241-41-46

*Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко*

### ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОЦЕССА КРУГОВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ОБЖАТИЯ ПРЯДИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Проведено моделирование процесса кругового пластического обжатия пряди конструкции 1+6 протягиванием в четырех парах роликов. Установлено вспучивание проволок наружного слоя пряди перед входом в первую пару роликов, а также выборочное образование локальных участков резко увеличенной пластической деформации на наружной поверхности проволок.

**Ключевые слова:** прядь, проволока, круговое пластическое обжатие, роликовая волока, пара роликов, моделирование, поперечная деформация, вспучивание.

*L. M. Gurevich, V. F. Danenko*

### ABOUT THE FEATURES OF THE PROCESS OF CIRCULAR PLASTIC COMPRESSION STRANDS

Volgograd State Technical University

A simulation of the process of circular plastic compression of a strand of construction 1+6 by stretching in four pairs of rollers is carried out. It is established that the wires of the outer layer of the strand swell before entering the first pair of rollers, as well as selective formation of local areas of sharply increased plastic deformation on the outer surface of the wires.

**Keywords:** strand, wire, circular plastic compression, roller drawing, pair of rollers, modeling, transverse deformation, swelling.

Стальные канаты из пластически обжатых прядей, благодаря ряду преимуществ [1] по сравнению со стандартными канатами, нашли широкое применение в различных отраслях народного хозяйства [2]. Круговое пластическое обжатие прядей и канатов наиболее просто и легко осуществляется их протягиванием в монолитных или роликовых волоках.

В процессе обжатия пряди ось проволок наружного слоя, представляющая собой винтовую линию, переходит в новое положение (рис. 1). Центры тяжести проволок, составляющих сечение пряди, смещаются радиально на величину  $\Delta r = r_1 - r_2$  и переходят из точки  $C_1$  в точку  $C_2$  ( $C_1$  и  $C_2$  – центры тяжести круглой и деформированной проволок, соответственно).

Радиальное смещение центров тяжести должно сопровождаться удлинением проволок пряди

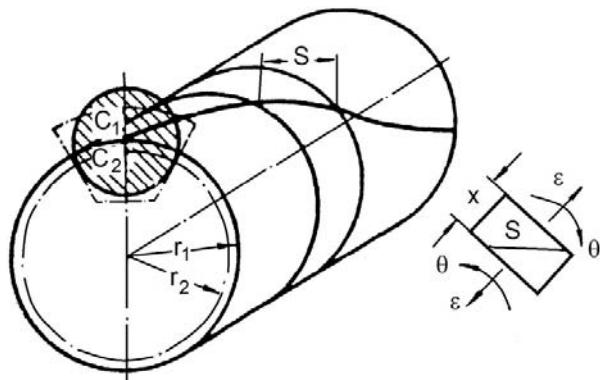


Рис. 1. Схема радиального обжатия пряди [3]

ди в целом. Такой вывод следует из анализа уравнения деформации для линейно контактирующих элементов, полученного М. Ф. Глушко [4]

$$\varepsilon_s = \varepsilon \cos^2 \alpha + \theta r \sin \alpha \cos \alpha - \varepsilon_r \sin^2 \alpha, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_s = \Delta s / s$  – относительное удлинение оси проволоки каната (кроме центральной);  $\varepsilon = \Delta l / l$  – относительное осевое удлинение каната ( $l$  – длина отрезка каната);  $\varepsilon_r = \Delta r / r$  – относительная радиальная (поперечная) деформация каната;  $\theta = \Delta\phi / \phi$  – относительный угол скручивания каната;  $r$  – радиус центра тяжести проволоки;  $\alpha$  – угол свивки.

При круговом обжатии каната без его удлинения ( $\varepsilon = 0$ ) и скручивания ( $\theta = 0$ ) из уравнения (1) следует

$$\varepsilon_s = -\varepsilon_r \sin^2 \alpha \quad (2)$$

Отрицательное значение относительного удлинения  $\varepsilon_s$  указывает, что при круговом обжатии проволока как винтовой элемент должна сжиматься в осевом направлении, но т. к. сжатия не происходит, то образуется излишняя длина, которая вытесняется из роликов и скапливается перед ними, что приводит к выпучиванию (фонарению) пряди [3]. Устранение фонарения может быть обеспечено *противонатяжением* или *подкруткой* каната. Все необходимые параметры противонатяжения и подкрутки могут быть рассчитаны из условия

$$\varepsilon \cos^2 \alpha + \theta r \sin \alpha \cos \alpha \geq \varepsilon_r \sin^2 \alpha. \quad (3)$$

При этом надо учитывать, что различные слои проволок в канате получают различное радиальное обжатие  $\Delta r$  и укорочение  $\varepsilon_s$ . Расчет деформаций  $\varepsilon$  и  $\theta$  следует производить по наибольшей величине  $\varepsilon_s$  (наружный слой).

Частные случаи режима обжатия:

а) обжатие без противонатяжения ( $\varepsilon = 0$ ;  $\theta \neq 0$ ). Излишняя длина проволок расходуется на подкрутку

$$\theta_{\min} \geq \frac{\Delta r}{r^2} \operatorname{tg} \alpha \quad (4)$$

б) обжатие без подкрутки ( $\theta = 0$ ;  $\varepsilon \neq 0$ ). Излишняя длина проволок выбирается за счет противонатяжения

$$\varepsilon_{\min} \geq \frac{\Delta r}{r} \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (5)$$

Для оптимизации режимов обжатия прядей в последние десятилетия начали использовать методы компьютерного моделирования, позволяющие определить распределение деформации по сечению проволок, профиль получаемой пряди [5–7].

Целью работы является анализ методом компьютерного моделирования причин и выбор методов устранения выпучивания (фонарения) проволок в слоях при пластическом обжатии пряди.

#### Материалы и методы исследования

Моделирование процесса формирования напряжений и изменения деформации в обжимаемой пряди проводилось с использованием программного комплекса SIMULIA/Abaqus компании Abaqus, Inc. (USA), в котором реализован метод конечных элементов (МКЭ), модуля Abaqus/Explicit, использующего явную схему интегрирования для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов. Расчет проводился с использованием модели Мизеса. Материалы элементов деформируемой системы задавались изотропными с повышающимися пределами текучести  $\sigma_{0.2}$  при росте локальной пластической деформации. Для моделирования использовали фрагмент пряди конструкции 1+6 длиной  $l_0 = 400$  мм. Процесс обжатия пряди моделировали для клети с четырьмя парами роликов. В связи с неоднородностью деформации проволоки в различных направлениях при прохождении ручья роликовой волоки, изменение размеров в поперечном сечении пряди фиксировали в трех направлениях (рис. 2).

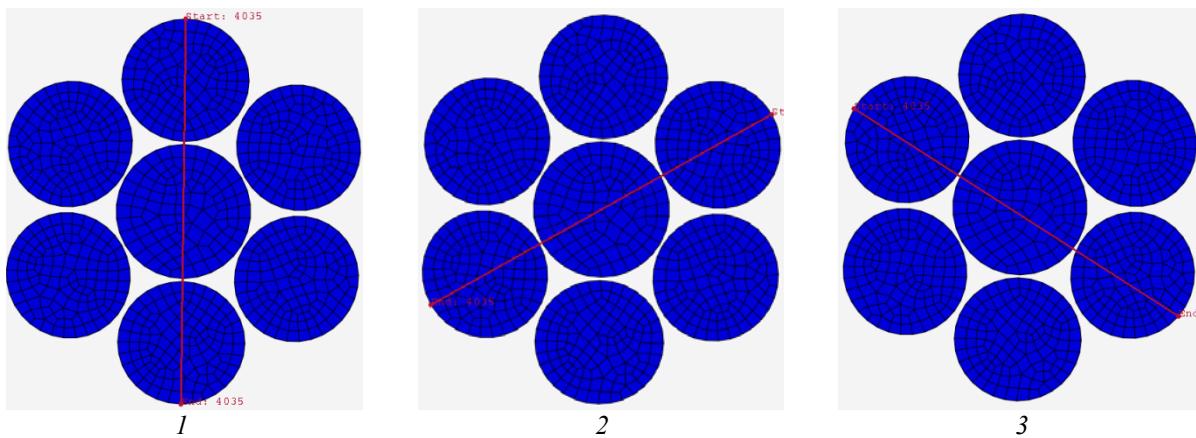


Рис. 2. Направления измерения размеров в поперечном сечении пряди

Диаметры проволок моделируемой пряди: центральной 1,1 мм, наружного слоя 1,03 мм. Маркировочная группа прочности проволок наружного слоя 1960 МПа. При создании геометрического образа наружного слоя учитывали, что проволока с шагом свивки  $t = 26$  мм наклонена к продольной оси, поэтому моделировалось ее сечение плоскостью, нормальной к оси пряди, в виде эллипса с малой осью 1,05 мм и большой 1,086 мм.

Внешний вид модели из четырех пар роликов показан на рис. 3. Первая пара роликов горизонтальная, затем плоскости роликов чередуются. Расстояние между очагами деформации каждой пары роликов 80 мм. На обоих концах фрагмента пряди «приклеены» к проволокам наружного слоя жесткие диски диаметром  $\varnothing 2,92$  мм, позволяющие исключить расплетание наружного слоя и перемещать фрагмент по заданному режиму.

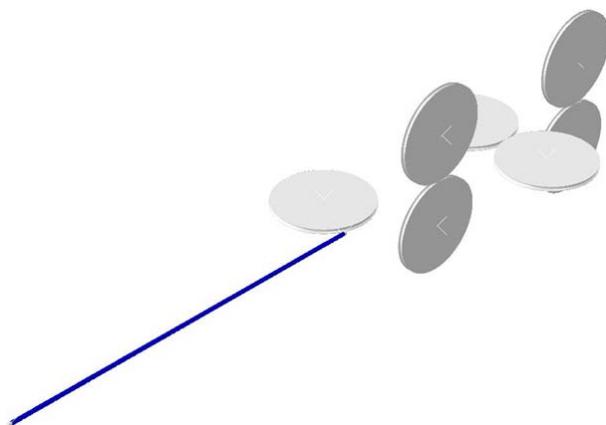


Рис. 3. Внешний вид модели  
(один из роликов первой пары условно не показан)

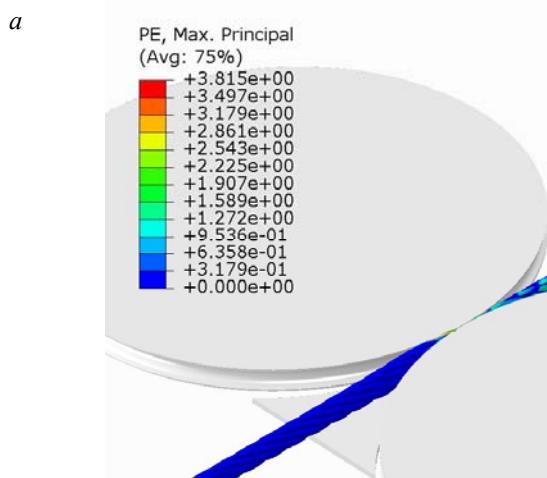


Рис. 5. Изменение пластической деформации пряди при прохождении первой пары роликов:  
а – участок с сильно выраженной локальной деформацией; б – участок раздавливания одного из витков локальной деформацией (по стрелке);  
в – увеличенный участок раздавливания при условном удалении одного из роликов первой пары и верхнего фигурного сектора  
См. также на с. 44

При моделировании обжатия скорость вращения роликов составляла  $n = 1$  об/с, осевого перемещения пряди относительно роликов  $v = 0,25$  м/с. Вращение обоих дисков вокруг оси пряди исключалось.

Для исключения попадания витков в зазор между наружными цилиндрами пары роликов были добавлены фигурные сектора (рис. 4).

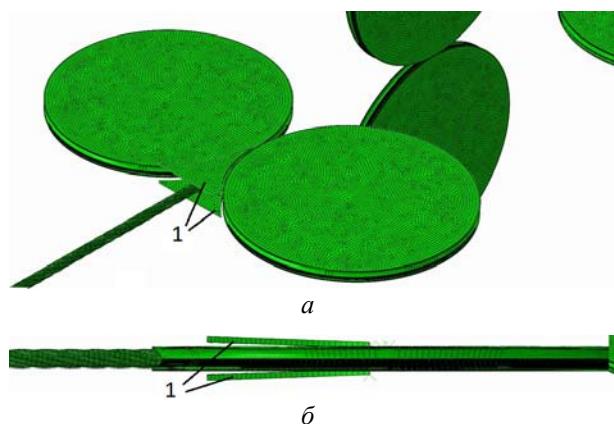
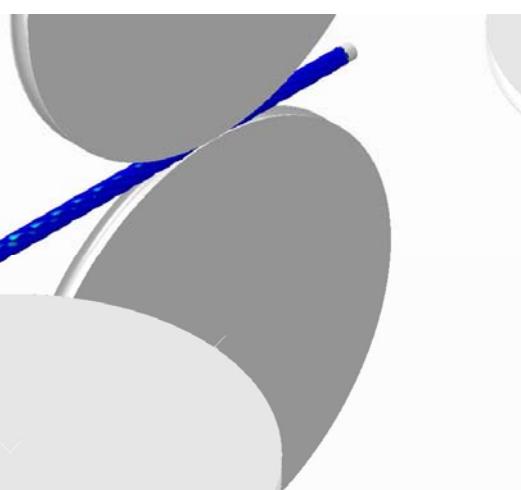


Рис. 4. Добавленные фигурные сектора (1) на входе в первую пару обжимающих роликов в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

### Результаты и их обсуждение

На рис. 5 показано изменение пластической деформации пряди при прохождении первой пары роликов без противонатяжения и скручивания ( $\varepsilon = 0$ ;  $\theta = 0$ ) вплоть до разрушения витков вследствие попадания в зазор между наружными цилиндрами пары роликов и раздавливания.



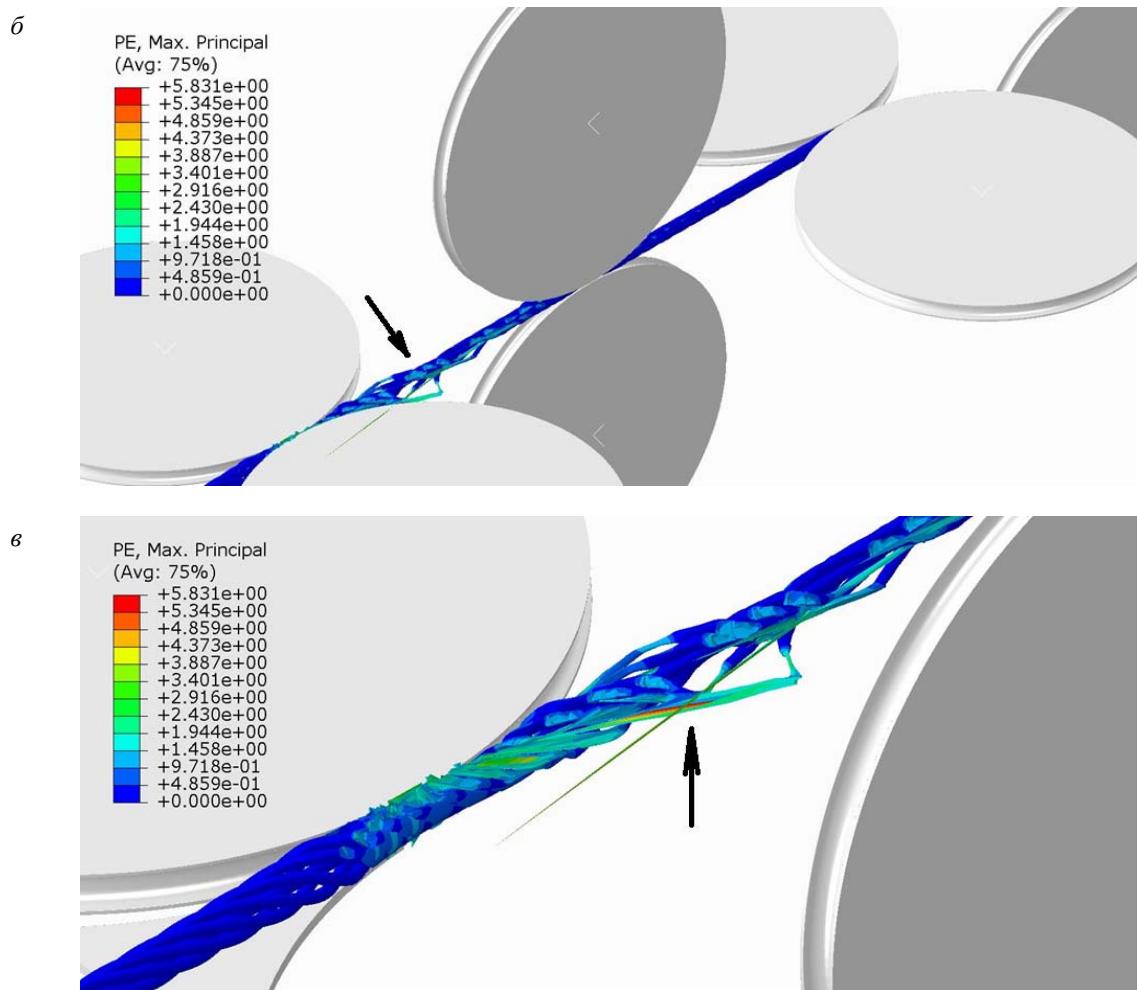


Рис. 5. Окончание

На начальном участке фрагмента пряди при прохождении первой пары роликов окраска при визуализации пластической деформации практически однородно синяя, что указывает на незначительную локальную величину деформации. В дальнейшем на картине визуализации пластической деформации на верхних и нижних участках витков наружного слоя появляются зоны голубовато-зеленоватого цвета, свидетельствующие о локальных деформациях до 160 %, происходит искажение укладки витков (фонарение) (рис. 5, *а*) и раздавливание проволок (рис. 5, *б* и *в*). Как видно из рис. 6, участки резко увеличенной локальной деформации наблюдаются при контакте с клиновым участком профиля ручья в ролике и его перехода в наружный цилиндр. Происходит это до входа в зону максимальной деформации и во многом связано с началом вспучивания проволок.

Наблюдаемая задержка образования «фонаря» при обжатии в первой паре роликов может быть связана с накоплением излишней длины винтового элемента пряди перед входом в ролики  $\Delta S$ . Избыток длины  $\Delta S$  при обжатии пряди конструкции 1+6 может быть определен также аналитически [3]. Необходимые для расчета данные приведены в таблице.

Значение относительной поперечной деформации пряди в направлении 1 (степени линейного обжатия)

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r_1} = \frac{0,0924}{1,065} = 0,087,$$

где  $r_1 = r_b + r_{\text{ц}} = 0,515 + 0,55 = 1,065$  мм – радиус центра тяжести проволок наружного слоя до обжатия. Следует отметить, что при обжатии пряди конструкции 1+6 до значения степени линейного обжатия  $\approx 7,5$  % преобладают поперечные деформации проволок за счет зазоров [3].

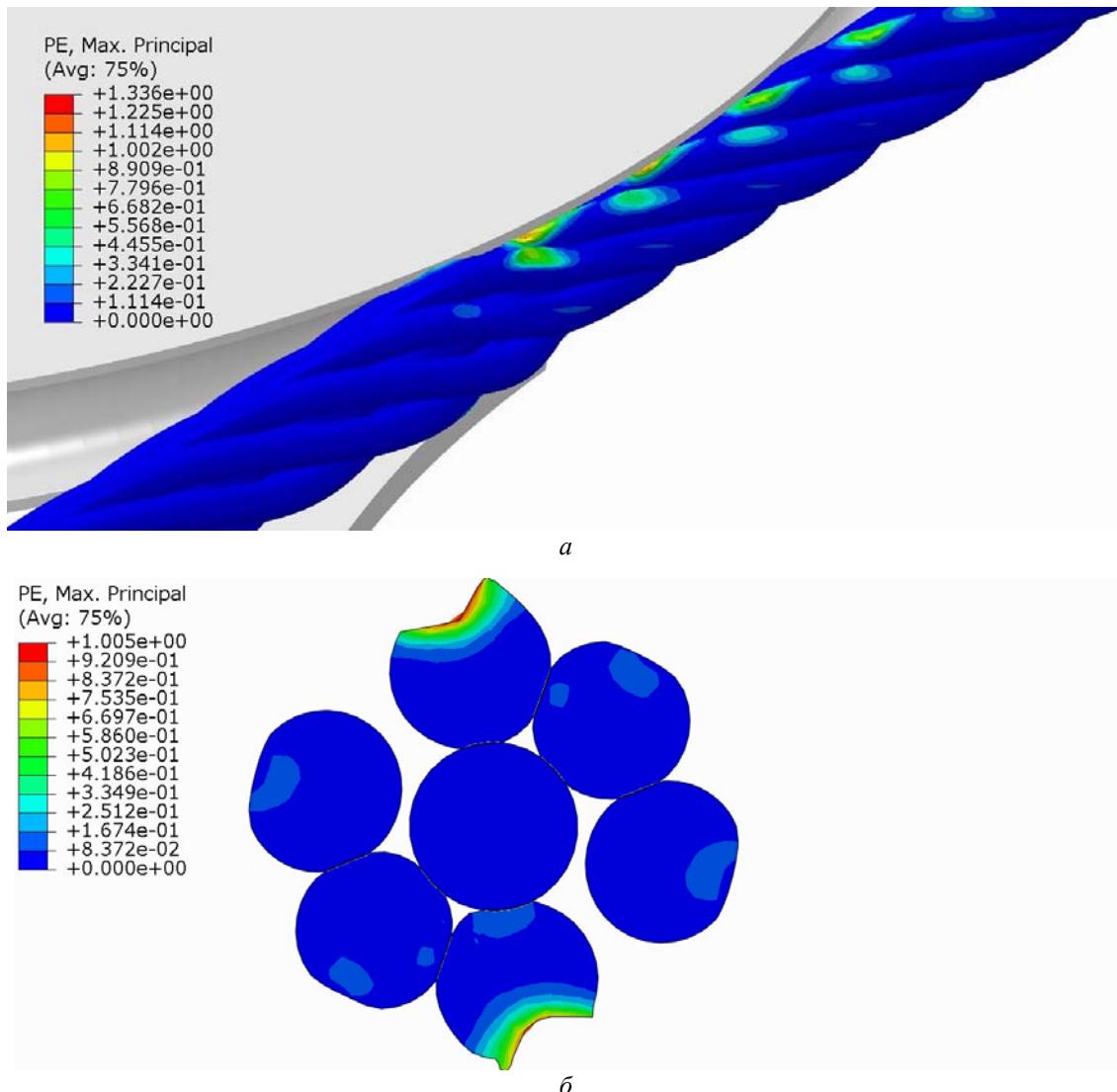


Рис. 6. Начало фонарения (а) и увеличенное поперечное сечение обжимаемой пряди (б) при входе в первую пару роликов

#### Геометрические характеристики обжатия пряди конструкции 1+6 в заданных направлениях

Направление измерения	Радиус центральной проволоки, $r_{\text{ц}}$ , мм	Радиус проволоки наружного слоя, $r_{\text{в}}$ , мм	Радиус исходной пряди, $r_{\text{и}}$ , мм	Радиус пряди после обжатия в первой паре волок, $r_{\text{o}}$ , мм	Степень радиального обжатия пряди, $\Delta r$ , мм
1	0,55	0,515	1,6494	1,557	0,0924
2			1,6494	1,622	0,0274
3			1,6454	1,610	0,0354

При угле свивки наружного слоя  $\alpha=15,2^\circ$  имеем  $\sin^2\alpha=0,0687$ . Тогда уравнение (2) для пряди конструкции 1+6 примет вид

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{S} = 0,087 \cdot 0,0687 = 0,006,$$

откуда  $\Delta S=0,006 S$ .

Выразив  $S = l/\cos\alpha$ , где  $l = 120$  мм – длина отрезка пряди, пропущенной через первую и вторую пару роликов (рис. 5, а), а  $\cos \alpha = 0,965$ ,

получим  $\Delta S=0,006 \cdot 124,35 \approx 0,75$  мм – значение избытка длины пряди перед первой парой волок. Полученное значение может быть достаточным для начала вспучивания проволок наружного слоя. С увеличением длины протянутой пряди (протягиванием через третью и четвертую пару роликов) величина  $\Delta S$  возрастает.

Таким образом, круговое обжатие пряди конструкции 1+6 в четырех парах роликов без

противонатяжения и подкрутки перед входом в первую пару роликов не позволило полностью исключить вспучивание проволок наружного слоя. Даже при наличии фигурных направляющих секторов, при обжатии в первой паре роликов в наружном слое пряди в конце очага деформации появляются локальные участки резко увеличенной пластической деформации. Для устранения нежелательных факторов предлагается использование трех- или четырехроликовой волоки [8], а также дополнительное подкручивание наружного слоя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Скалацкий, В. К.* Канаты из обжатых прядей / В. К. Скалацкий // Стальные канаты. – Вып. 1. – Киев : Техника, 1964. – С. 152–158.
2. *Даненко, В. Ф.* Повышение физико-механических и служебных свойств пластически обжатых стальных прядей и изготовленных из них канатов / В. Ф. Даненко, Л. М. Гуревич, С. Ю. Шаталин, И. С. Кишечникова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (168) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 72–76.
3. *Скалацкий, В. К.* Геометрия деформации проволок при круговом обжатии прядей / В. К. Скалацкий // Стальные канаты. – Вып. 2. – Киев : Техника, 1965. – С. 254–260.
4. *Глушко, М. Ф.* Стальные подъемные канаты / М. Ф. Глушко. – Одесса : Астропринт, 2013. – 336 с.
5. *Харитонов, В. А.* Формирование геометрии контактной поверхности проволок при пластическом обжатии пряди / В. А. Харитонов, А. Б. Иванцов, Т. А. Лаптева // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2016. – № 1 (44). – С. 53–59.
6. *Харитонов, В. А.* Расчет распределения деформаций по сечению пряди при круговом обжатии / В. А. Харитонов, Т. А. Лаптева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2012. – № 4. – 47–51.
7. *Харитонов, В. А.* Повышение эффективности производства стальных подвижных канатов применением калибрующего обжатия прядей / В. А. Харитонов, Т. А. Лаптева // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2014. – № 2 (41). – С. 13–19.
8. *Гуревич, Л. М.* Об особенностях моделирования кругового пластического обжатия спирального каната / Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (188) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 52–55.