



*It reviews, that the use of FreeCooling technology at the JSC «BSW», will help to increase cooling capacity of equipment, to reduce energy costs, to extend the life of the cooling machine compressors, to increase the reliability of the existing cooling machines.*

Ю. Л. БОБАРИКИН, М. Н. ВЕРЕЩАГИН, С. В. АВСЕЙКОВ, ГГТУ им. П. О. Сухого,  
А. В. ВЕДЕНЕЕВ, Е. В. ШАМАНОВСКАЯ, ОАО «БМЗ»

УДК 621.778.073

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВИВКИ МЕТАЛЛОКОРДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Свивка металлокорда из тонкой латунированной проволоки – заключительный технологический этап металлургического производства металлокорда. Одним из основных количественных параметров технологичности свивки является удельная обрывность металлокорда. Дефекты проволок, приводящие к обрывности при ее свивке в металлокорд, подразделяются на следующие виды: поверхностные дефекты, неметаллические включения, сужение проволоки, осевые трещины, расслоение и кручение. При всем многообразии дефектов всех их объединяет одно обстоятельство: они вызывают обрыв в проволоке при ее деформации в процессе свивки. Удельная обрывность металлокорда снижает производительность процесса свивки, а также качество металлокорда. В связи с этим возникает необходимость в определении условий свивки, при которых удельная обрывность металлокорда минимальна. Условия свивки характеризуются напряженно-деформированным состоянием проволок в металлокорде. Поэтому для повышения технологичности свивки учитывается напряженно-деформированное состояние проволок в металлокорде в процессе свивки.

Аналитическое и экспериментальное определение параметров напряженно-деформированного состояния проволоки при свивке в металлокорд затруднено в связи с высокой степенью сложности схемы пространственной деформации проволок при свивке, с отсутствием экспериментальной базы, имитирующей процесс свивки для детального изучения процесса.

Альтернативным является численное моделирование процесса свивки, признанного в современном моделировании процессов обработки материалов как самое эффективное [1], которое позволяет объяс-

нить основные особенности процесса и детально исследовать свойства проволоки в процессе свивки. Численное моделирование процесса свивки требует учета нелинейности как деформационной, так и геометрической, а также скоростей деформации и контактного взаимодействия между проволоками.

Численное моделирование предполагает выполнение следующих этапов: построение модели материала, геометрической модели и описание кинематической схемы процесса свивки, начальных и граничных условий, расчет и анализ полученных результатов.

### *Модель материала*

В дальнейших расчетах будет использоваться сверхвысокопрочный металлокорд 2+2x0,30 SHT, выпускаемый на ОАО «БМЗ». Такой металлокорд изготавливается из стальной латунированной тонкой проволоки марки 80К диаметром 0,30 мм. Для описания соотношения деформаций и напряжений в проволоке выбрана упругопластическая модель Мизеса – модель пластичности с пределом текучести в виде мультипликативной зависимости, учитывающая деформационное пластическое упрочнение и эффект Боушингера [2]:

$$\sigma_\varepsilon(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p) = \left[ A + B(\varepsilon_p)^n \right] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\sigma_\varepsilon$  – напряжения текучести, МПа;  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация;  $\dot{\varepsilon}_p$  – скорость пластической деформации.

### *Исходные параметры модели*

Упругие постоянные: модуль упругости  $E$ , ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ .

Пластические постоянные:  $A$  – начальный предел текучести при  $\dot{\varepsilon}_p = \dot{\varepsilon}_0$ , МПа,  $B$  – модуль

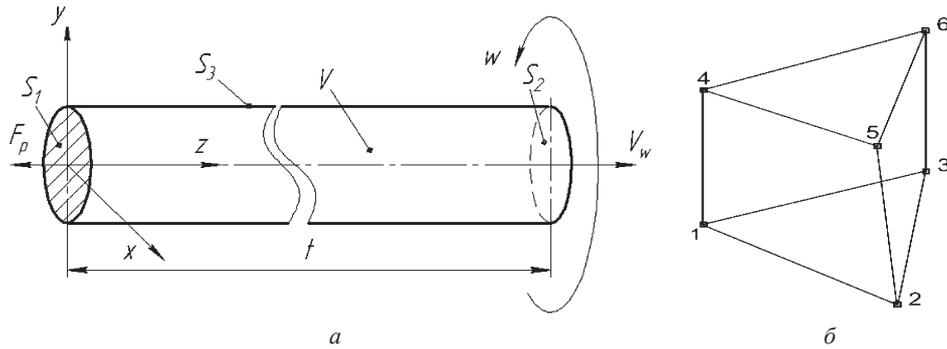


Рис. 1. Геометрическое описание задачи: а – геометрическая модель и граничные условия; б – тип расчетного конечного элемента

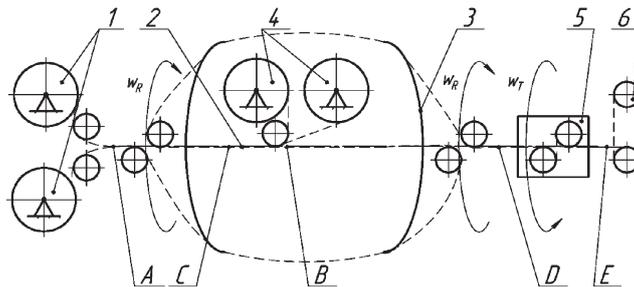


Рис. 2. Кинематическая схема канатной машины TD2/202: 1 – внешние питающие катушки; 2 – пучок проволоки; 3 – тазы; 4 – внутренние питающие катушки; 5 – торсион; 6 – кабанстан

упрочнения, МПа,  $n$  – показатель функции, аппроксимирующей участок пластической деформации на диаграмме растяжения,  $\dot{\epsilon}_0$  – начальная скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ ,  $C$  – коэффициент, описывающий характер зависимости предела текучести от скорости деформации.

При повышении скорости деформации растет неравномерность напряженного и деформированного состояния, что приводит к локализации деформации и разрушению проволоки [3]. С возрастанием скорости деформации увеличивается доля упругих деформаций, но при этом уменьшается запас пластичности [4]. В связи с этим определение коэффициента  $C$  в зависимости (1) позволит в полной мере учесть интенсивность деформаций в процессе свивки.

Для определения приведенных параметров модели материала исследуемой проволоки была проведена серия испытаний на осевое растяжение [5], по результатам которых были найдены неизвестные упругие и пластические постоянные: модуль упругости  $E = 198$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; пластические:  $A = 3167$  МПа,  $B = 27570$  МПа,  $C = 0,055$ ,  $n = 1$ . Скорость растяжения  $V_p$  изменялась в диапазоне 60–560 мм/мин для образцов проволоки с длиной рабочей части  $l_0 = 100$  мм, а для образцов с  $l_0 = 50$  мм скорость растяжения составляла  $V_p = 60$  мм/мин, что соответствует скоростям деформации в диапазоне  $\dot{\epsilon}_p = 0,0078\text{--}1,1 \text{ с}^{-1}$ . За начальную скорость деформации  $\dot{\epsilon}_0$  принято значе-

ние скорости деформации при растяжении образца проволоки со скоростью  $V_p = 60$  мм/мин при  $l_0 = 100$  мм.

### Геометрическая модель и кинематическая схема процесса свивки

Напряженно-деформированное состояние объема проволоки  $V$  рассматривается в трехмерной постановке в декартовой системе координат (рис. 1). На рис. 1, а изображены область проволоки, равная шагу свивки ( $t$ ), и граничные условия. В направлении оси  $Z$  проволока имеет длину, во много преувеличивающую очаг деформации, поэтому за очаг деформации (основной участок концентрации НДС) принимаем фрагмент проволоки, равный шагу ( $t$ ) металлокорда. Это позволит уменьшить до оптимального количество элементов геометрической модели и соответственно снизить время расчета. Пространственная постановка задачи допускает скольжение свиваемых проволок в процессе свивки относительно друг друга вдоль оси металлокорда, что соответствует реальным условиям свивки.

Исследуемый объем проволоки разбиваем на конечные элементы в виде треугольной призмы с шестью узловыми точками, представленными на рис. 1, б.

На рис. 2 приведена кинематическая схема канатной машины TD2/202, на которой изображены основные участки деформации проволок в процессе свивки в металлокорд 2 + 2x0,30 ШТ.

Изменение параметров объема  $V$  (см. рис. 1, а) для каждой проволоки (шаг и направление свивки) в процессе свивки в металлокорд, согласно представленной на рис. 2 кинематической схеме канатной машины, проводится в следующей последовательности: две проволоки с внешних питающих катушек перемещаются параллельно с натяжением, равным усилию торможения  $F_p$  на катушках 1. Проволоки с внешних питающих катушек формируют сердцевину металлокорда и располагаются внутри металлокорда. Затем на участке  $A$  под действием вращающихся с частотой ротора  $w_R$  тазов 3 проволокам передается левое ( $S$ ) закручивание до шага  $t = 32$  мм. От участка  $A$  до входа во внутреннее пространство тазов проволоки с наружных катушек продолжают докручиваться до шага  $t = 16$  мм. Находясь внутри тазов 3, эти проволоки начинают постепенно раскручиваться ( $Z$ -свивка) и на промежутке между участком  $B$  и  $C$  к ним добавляются две параллельные проволоки с внутренних питающих катушек 4 (наружные проволоки в структуре корда) с аналогичным осевым натяжением  $F_p$ . Достигая участка  $C$ , внутренние проволоки раскручиваются ( $Z$ -свивка) до шага  $t = 32$  мм, в то время как наружные закручиваются ( $Z$ -свивка) до шага  $t = 32$  мм. Достигая участка  $D$ , внутренние проволоки полностью раскручиваются до условно параллельного состояния (под действием наружных проволок внутренние испытывают изгиб), а наружные продолжают докручиваться до шага  $t = 16$  мм. В то же время торсион 5, вращаясь с частотой  $w_T$ , осуществляет правое ( $Z$ -свивка) закручивание наружных проволок до шага  $t = 8$  мм, а внутренних до шага  $t = 32$  мм. После выхода из торсиона 5 проволоки в уже готовом металлокорде формируют необходимый шаг свивки металлокорда, равный  $t = 16$  мм.

#### Описание начальных и граничных условий

Предположим, что КЭ-модель проволоки  $V$  своей правой частью ограничена и прикреплена к поверхности  $S_2$  с заданными на ней перемещениями  $U(w, V_w)$ , которые передаются от узлов канатной машины в процессе свивки проволоке. К противоположной стороне модели на поверхности  $S_1$  приложена сила, равная усилию торможения на питающих катушках  $F_p$ .

Таким образом, задача сводится к определению напряженно-деформированного состояния объема проволоки при кручении с изгибом в пространственной постановке с учетом контактного взаимодействия с другими проволоками. Решение задачи представляется возможным при следующих основных упрощениях:

- Материал проволоки считаем сплошным, несжимаемым, изотропным и упругопластичным.

- Предполагается, что температура проволоки во всех точках изменяется в диапазоне температур, не влияющем на структурные свойства проволоки и не изменяющие механические характеристики.

- Считаем, что пластическая деформация металла проволоки приводит к увеличению предела упругости при повторной деформации того же знака и уменьшению его при повторной деформации противоположного знака (эффект Боушингера) [6].

- Предполагается, что площадь контакта между телами в поперечном сечении мала по сравнению с их размерами и не изменяется при деформации. При распространении зоны контакта по длине проволоки ее вид представляет собой объемную спираль. Тогда в рамках конечно-элементного представления считаем, что контакт между телами рассматриваем как узел, принадлежащий двум проволокам одновременно [7]. Предположение относится ко всей совокупности проволок, входящих в структуру металлокорда. Принята модель трения Кулона с коэффициентом контактного трения  $f = 0,15$  [8].

#### Анализ результатов расчета

На основании описанной численной модели свивки проволок в металлокорд был произведен расчет напряженно-деформированного состояния проволок в процессе свивки. Расчет проводился согласно кинематической схеме канатной машины и формируемых на ней параметров металлокорда, описанных ранее. Результаты расчета представлены в виде цветочкодированных значений относительной пластической деформации проволок на каждом этапе свивки (см. таблицу). Согласно полученным данным, максимальная деформация приходится на проволоки при скручивании в торсионе. Практические статистические данные подтверждают результаты расчетов – основная обрывность фиксируется при обработке в торсионе.

Анализируя представленные в таблице цветочкодированные изображения относительной пластической деформации проволок на участках свивки, можно сделать заключение о том, что участок свивки металлокорда в торсионе является наиболее нагруженным для проволок, особенно наружных (участок  $D_1$ ).

Для оценки точности полученных результатов сравним параметры полученного численным методом металлокорда с натурным металлокордом по расположению проволок в осевом направлении (рис. 3) и сечении  $A-A$  (рис. 4).

Значения пластической деформации проволок на разных этапах свивки металлокорда

Цветокодированная шкала		Участки свивки металлокорда (рис. 3)					
		A	B	C	D	D <sub>1</sub>	E
Относительная пластическая деформация							
	0,05						
	0,045						
	0,04						
	0,035						
	0,03						
0,025							
0,02							
0,015							
0,01							
0,005							
0							
Шаг (t), мм, направление свивки проволок	Внутреннее	32, S	16, S	32, Z	∞, Z	32, Z	∞
	Наружное	–	–	32, Z	16, Z	8, Z	16

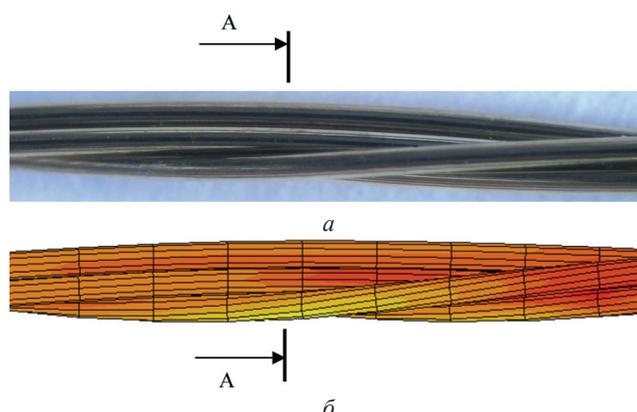


Рис. 3. Фрагмент металлокорда (8 мм) конструкции 2+2x0,30 SHT при t = 16 мм: а – металлокорд; б – виртуальная модель металлокорда

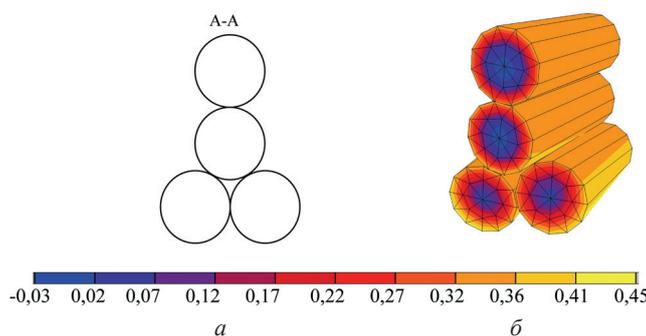


Рис. 4. Конструкция металлокорда 2+2x0,30 SHT: а – теоретическая; б – полученная в результате численного расчета

Из рис. 3, 4 видно, что полученное численным моделированием расположение проволок по длине и сечению металлокорда 2+2x0,30 SHT соответствует конструкции металлокорда, выпускаемого в реальных условиях ОАО «БМЗ».

**Выводы**

Полученная численная модель свивки металлокорда с использованием метода конечных эле-

ментов позволяет с достаточной степенью адекватности описывать процессы свивки металлокорда. Описание процесса свивки металлокорда дает возможность прогнозировать изменение технологических параметров свивки металлокорда при изменении механических характеристик стальной латунированной тонкой проволоки перед свивкой и при изменении условий свивки. Появляется воз-

возможность определения напряженно-деформированного состояния в проволоках при свивке металлокорда, что в свою очередь позволит установить максимальные деформационные и силовые

нагрузки в проволоке, прогнозирующие возможность обрывов. Модель позволяет оптимизировать кинематику свивки металлокорда, повысить производительность и качество свивки.

### Литература

1. Erdem Imrak C., Erdonmez C. On the problem of wire rope model generation with axial loading // *Mathematical and Computational Applications*, 2010. Vol. 15. P. 259–268.
2. Кукуджанов В. Н. Компьютерное моделирование деформирования, повреждаемости и разрушения неупругих материалов и конструкций: Учеб. пособ. М.: МФТИ, 2008.
3. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. Ч. 1.
4. Верещагин М. Н., Бобарикин Ю. Л., Савенок А. Н., Веденеев А. В. и др. Влияние скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние высокоуглеродистой проволоки // *Сталь*. 2007. № 12. С. 53–58.
5. ASTM A 370–07a. Стандартные методы испытаний и определения для механического испытания стальной продукции.
6. Аркулис Г. Э., Дорогобид В. Г. Теория пластичности: Учеб. пособ. для вузов. М.: Металлургия, 1987.
7. Емельянов И. Г. Модель напряженного состояния стального каната // *Сталь*. 2001. № 10. С. 50–52.
8. Jiang W. G., Henshall J. L. The analysis of termination effects in wire strand using finite element method // *Journal of Strain Analysis*. 1999. P. 31–38.