

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ В ПРОЦЕССЕ СВИВКИ МЕТАЛЛОКОРДА

**С. В. Авсейков**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель Ю. Л. Бобарикин

Свивка металлокорда из тонкой латунированной проволоки является заключительным технологическим этапом металлургического производства металлокорда. На этом этапе проявляются несоответствия техническим условиям предшествующих технологических этапов изготовления металлокорда. Проявления несоответствий выражается в виде снижения технологичности свивки. Одним из основных количественных параметров технологичности свивки является удельная обрывность проволок при их свивке в металлокорд. Обрывность проволок возникает на участках проволоки, на которых имеются источники возникновения обрывов, т. е. дефекты или концентраторы напряжений. Источники дефектов при полном соответствии всего технологического процесса техническим условиям должны отсутствовать или присутствовать в допустимых пределах появления случайных несоответствий. При увеличении числа несоответствий техпроцесса увеличивается и удельная обрывность. Повышенная удельная обрывность металлокорда снижает производительность процесса свивки, снижает качество металлокорда. В этой связи возникает необходимость в определении условий свивки, при которых удельная обрывность металлокорда минимальна и несоответствия техпроцесса предшествующих этапов проявляются при свивке минимально.

В связи с высокой степенью сложности схемы деформации проволок при свивке использовано численное моделирование с помощью конечно-элементного анализа, признанного в современном моделировании как самое эффективное.

Экспериментальное определение параметров напряженно-деформированного состояния проволоки при свивке в металлокорд чрезвычайно затруднено. Альтерна-

тивным является численное моделирование процесса, которое позволяет объяснить основные особенности процесса и детально исследовать свойства проволоки в процессе свивки. Математическое моделирование процесса свивки требует учета нелинейности как деформационной, так и геометрической, скоростей деформации и контактного взаимодействия между проволоками.

**Модель материала.** Принимается упругопластическая модель Мизеса – модель пластичности с пределом текучести в виде мультипликативной зависимости, включающая деформационное пластическое упрочнение и эффект Боушингера [8]:

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

где  $\sigma_{\varepsilon}$  – напряжения текучести, МПа;  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация;  $\dot{\varepsilon}_p$  – интенсивность пластических деформаций;  $T_{\text{отн}}$  – относительная температура, отнесенная к температуре плавления  $T_{\text{пл}}$ .

Так как процесс принят изотермическим, то  $T_{\text{отн}} = 0$ .

Материал проволоки принят однородным. В дальнейших расчетах будет использоваться материал стали исследуемых кордов (упругие постоянные: модуль упругости  $E$  (ГПа), коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; пластические:  $A$  (МПа),  $B$  (МПа),  $n$ ,  $\dot{\varepsilon}_0$ ,  $C$ , которые определяются при испытании образцов материала на осевое растяжение.

При повышении скорости деформации растет неравномерность напряженного и деформированного состояния, что приводит к локализации деформации и разрушению проволоки [10]. С возрастанием скорости деформации возрастает доля упругих деформаций, но при этом уменьшается запас пластичности [11]. В связи с этим определение коэффициента  $C$  в зависимости (1) позволит в полной мере учесть интенсивность деформаций в процессе свивки.

Для решения поставленной задачи объемного деформирования проволоки была проведена серия испытаний на осевое растяжение согласно [4] для определения неизвестных параметров модели материала исследуемой проволоки.

**Геометрическая модель процесса свивки.** Напряженно-деформированное состояние объема  $V$  проволоки рассматривается в трехмерной постановке. На рис. 1 изображены область проволоки 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 металлокорда. Пространственная постановка задачи допускает движения свиваемых проволок в процессе свивки вдоль оси металлокорда, что соответствует реальным условиям свивки.

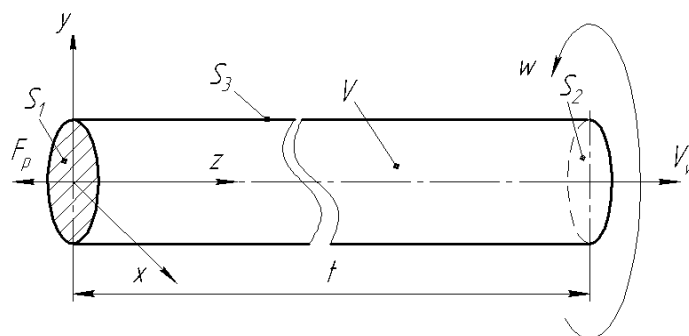


Рис. 1. Геометрия задачи и граничные условия

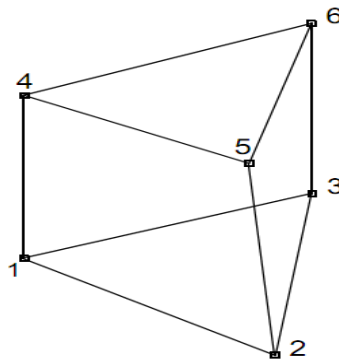


Рис. 2. Тип расчетного конечного элемента

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  $F_p$ .

Исследуемый объем проволоки разбиваем на конечные элементы с шестью узловыми точками, представленными на рис. 2

**Основные уравнения и граничные условия.** 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:

1. Материал проволоки считаем сплошным, несжимаемым и упруго-пластичным.

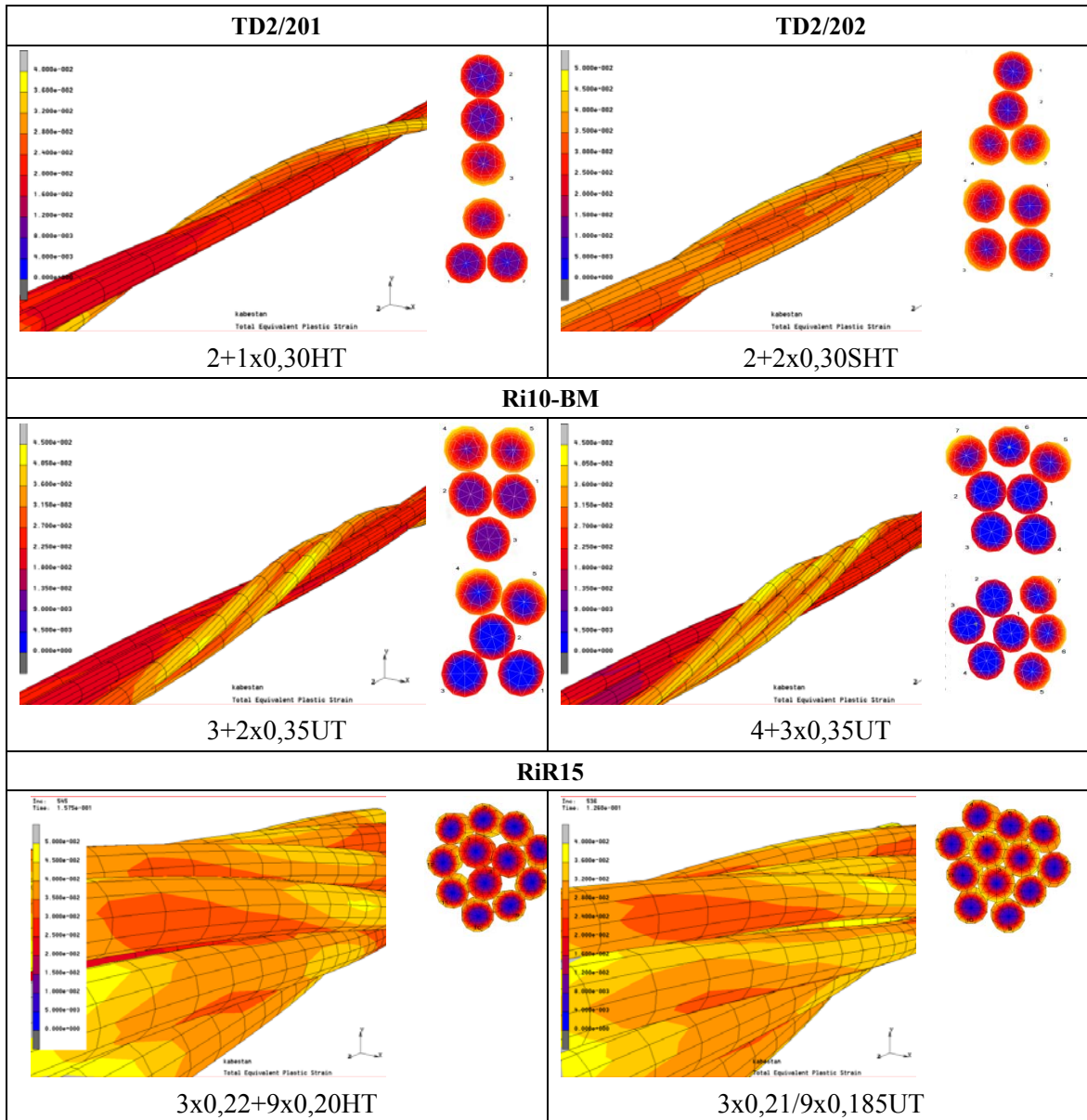
2. Предполагается, что температура проволоки во всех точках изменяется в узком диапазоне температур, не влияющем на структурные свойства проволоки и не изменяющие механические характеристики.

3. 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) [5].

4. Предполагается, что область контакта по контуру между телами мала по сравнению с их размерами и не изменяется при деформации. Так в рамках конечно-элементного представления контакт рассматривали как узел, принадлежащий двум проволокам [6].

На основании математического описания численной модели свивки исследуемых проволок в металлокорд были проведены расчеты напряженно-деформированного состояния с использованием МКЭ. Расчет проводился с учетом кинематических особенностей свивки канатных машин, на которых производится свивка исследуемого металлокорда. Результаты представлены в табл. 1.

Результаты численного моделирования свивки металлокорда



В табл. 2 представлены основные параметры исследуемой проволоки и их средние значения, которые, как предполагается, влияют на технологичность свивки металлокорда.

Таблица 2

Параметры технологичности свивки металлокорда

Тип канатной машины	Обозначение металлокорда	$\epsilon_{св}$ , %	$E$ , ГПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_{max}$ , %
TD2/202	2+1x0,30 HT	2,69	189	3327	2,36
TD2/401	2+2x0,30 SHT	3,96	198	3407	2,47

Окончание табл. 2

Тип канатной машины	Обозначение металлокорда	$\epsilon_{св}$ , %	$E$ , ГПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_{max}$ , %
Ri10-BM	3+2x0,35 UT	2,85	190	3755	2,54
Ri10-BM	4+3x0,35 UT	3,03	190	3755	2,54
RiR15	3x0,22+9x0,20 HT	4,26	217	3444	2,02
			210	3365	2,3
RiR15	3x0,21/9x0,185 UT	3,61	206	3783	2,64
			211	3394	1,96

Анализируя табл. 2, можно предположить, что технологичность металлокорда будет снижаться при увеличении соотношения между значением пластической деформации в процессе свивки  $\epsilon_{св}$  (максимально приобретаемое) к максимальным удлинениям проволок металлокорда перед свивкой  $\delta_{max}$  (максимально возможное).

#### Основные результаты:

1. Получена математическая модель позволяющая описывать процесс свивки металлокорда.
2. Экспериментальным путем определены параметры материала свиваемой проволоки.
3. Определены значения эквивалента пластической деформации проволоки в процессе свивки.

#### Литература

1. Компьютерное моделирование деформирования, повреждаемости и разрушения неупругих материалов и конструкций : учеб. пособие. – М. : МФТИ, 2008. – 215 с.
2. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 1 / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. – 472 с.
3. Влияние скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние высокоуглеродистой проволоки / М. Н. Верещагин [и др.] ; ООО «Интермет Инжиниринг» // Сталь. – 2007. – № 12. – С. 53–58.
4. ASTM A 370-07a, Стандартные методы испытаний и определения для механического испытания стальной продукции.
5. Аркулис, Г. Э. Теория пластичности : учеб. пособие для вузов / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобид. – М. : Металлургия, 1987. – 352 с.
6. Емельянов, И. Г. Модель напряженного состояния стального каната / И. Г. Емельянов // Сталь. – 2001. – № 10. – С. 50–52.