

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРОВОЛОКИ ПРИ СВИВКЕ В МЕТАЛЛОКОРД

¹УО «Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого»
г. Гомель, Беларусь

²Ченстоховский технологический университет
г. Ченстохово, Польша

Рассмотрены аналитический, экспериментальный и численный способы определения величины деформации проволоки при свивке в металлокорд. Показано, что наиболее приемлемым способом расчета деформаций при свивке является метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод наиболее точно отражает действительную картину деформации проволоки при свивке. Он не требует выполнения сложных экспериментальных работ и поэтому может быть широко использован для определения деформаций проволоки, в том числе сложных конструкциях металлокорда.

Analytical, experimental and numerical ways of definition wire deformation are observed at twist of steel cord. It is shown that the most comprehensible way of calculation wire deformation at twisting is the method of final elements. This method most precisely reflects the valid picture of wire deformation. He does not demand performance of difficult experimental works and consequently can be widely used for definition of wire deformations, including difficult designs of wire cords.

Изготовление металлокорда на канатных машинах двойного кручения сопровождается деформацией проволоки в объемную спираль с необходимым периодом, называемым шагом свивки. Шаг свивки назначается технологическими требованиями по качеству металлокорда. Свиваемая проволока подвергается сложной пространственной деформации по мере перемещения в канатной машине: растяжению, кручению и изгибу.

Особенность канатных машин двойного кручения заключается в дополнительном подкручивании проволоки в торсионном устройстве в области пластической деформации свиваемой проволоки для устранения остаточных упругих крутящих моментов [1]. В торсионном устройстве возникают максимальные деформации, повышающие вероятность обрыва проволоки при свивке в металлокорд [2].

Для определения расчетного значения относительной обрывности ($B_{расч}$) предложено использовать следующую феноменологическую модель [3]:

$$B_{\text{расч}} = \frac{E}{\sigma_{\text{в}} \cdot \left[(\delta)^3 - (\varepsilon_{\text{св}})^3 \right]} \cdot \frac{K_{\text{кин}} \cdot K_T}{K_N}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости Юнга, Па;

$\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление при разрыве, Па;

δ – относительное удлинение при растяжении, %;

$\varepsilon_{\text{св}}$ – максимальная деформация проволоки в процессе свивки (в торсионе), %;

$K_{\text{кин}}$ – коэффициент, учитывающий кинематическую сложность конструкции металлокорда;

K_T – коэффициент, учитывающий температурную чувствительность пластических свойств свиваемой проволоки в зависимости от марки стали;

K_N – коэффициент, учитывающий объем выпуска металлокорда.

Для определения величины $\varepsilon_{\text{св}}$ можно использовать аналитические, экспериментальные и численные методы. В настоящей работе выполнены исследования, целью которых являлось выявление наиболее точного способа определения величины деформации проволоки при свивке в металлокорд.

Определение деформации свиваемой в металлокорд проволоки аналитическими способами рассмотрено в работах Нестерова, Глушко, Фетисова, Королева, Виноградова, Costello. Основной причиной затрудняющей использование предложенных аналитических решений является сложность вычислений полученных выражений. В общем виде решение систем дифференциальных уравнений равновесия и деформаций предполагает ряд упрощений.

Представленная на рис. 1 расчетная схема определяет деформацию проволоки на основании расчетов величин кривизны K и кручения T проволоки в декартовой системе координат [4].

$$K = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R_{\text{св}}}{(R_{\text{св}}^2 + t^2)}, \quad (2)$$

где $R_{\text{св}}$ – радиус свивки проволоки, мм;

t – шаг свивки проволоки, мм.

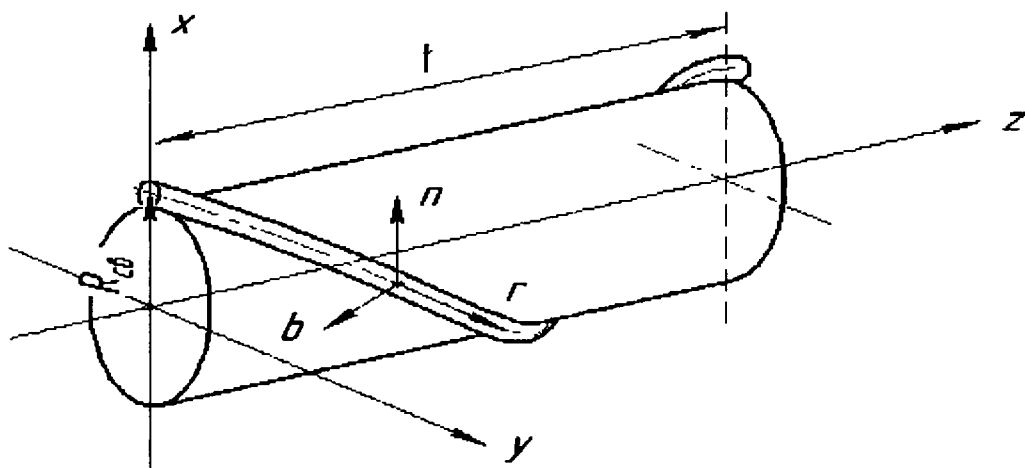


Рис. 1. Схема определения деформации свитой проволоки

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{(2 \cdot \pi \cdot R_{\text{св}}^2 + t^2)}, \quad (3)$$

Деформация растяжения проволоки определяется по выражению:

$$\varepsilon = K \cdot \frac{d}{2}, \quad (4)$$

где d – диаметр свиваемой проволоки, мм.

Деформация кручения проволоки определяется по выражению:

$$\gamma = T \cdot \frac{d}{2}, \quad (5)$$

Далее определяется интенсивность деформации проволоки:

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{\gamma^2}{3}}, \quad (6)$$

Предложенная методика не полностью учитывает изгибающую деформацию проволоки и в большей степени подходит для определения деформации при свивке проволоки на канатных машинах одинарного кручения. Как видно из схемы центральная проволока не подвержена деформации, что также ограничивает использование этого способа. Поэтому предложенная методика требует уточнения для расчета деформации проволок свиваемых в металлокорд на канатных машинах двойного кручения.

Экспериментальное определение параметров деформированного состояния проволоки при свивке в металлокорд чрезвычайно затруднено в виду формы и малых размеров исследуемых объектов. Большинство экспериментальных методов основаны на определении деформации в одной плоскости (метод разрезного образца, метод муаровых полос, метод делительных сеток) [4]. Использование метода делительной сетки представляется наиболее предпочтительным в виду простоты подготовки образцов проволоки. Однако, для нанесения на поверхность тонкой проволоки диаметром от 0,30 до 0,35 мм делительной сетки необходимо высокоточное оборудование. Обработка полученных результатов искажения сетки также затруднено и связано с конечной формой свитой проволоки. После свивки делительная сетка искажается и располагается на поверхности спирали, что затрудняет определение параметров сетки. Способы перевода основаны на искажении сетки в одной плоскости.

Альтернативным способом является численное моделирование процесса свивки, основанного на использовании МКЭ [6]. Этот метод расширяет возможности экспериментального метода делительных сеток и позволяет использовать его для определения трехмерного деформированного состояния свиваемой проволоки. Определение трехмерного деформированного состояния свиваемой проволоки позволит объяснить основные особенности процесса свивки и исследовать изменение деформации проволоки. Численное моделирование позволяет учитывать сложность конструкции металлокорда, скорость деформации и контактное взаимодействие между проволоками. Поэтому использование МКЭ для определения деформированного состояния в процессе свивки позволит определить величину деформации проволок металлокорда на всех этапах свивки в канатной машине двойного кручения, чего не было предложено ранее. Проверку адекватности результатов численного моделирования предполагается провести на простых схемах свивки. Это позволит сравнить результаты численного моделирования с результатами известных аналитических и экспериментальных способов.

Для экспериментального определения деформированного состояния проволоки при свивке использовался метод делительных сеток. Этот метод является наиболее применяемым при исследовании больших пластических деформаций.

На поверхность исследуемой проволоки наносится делительная сетка способом царапания. Размер одной ячейки составляет в среднем 3,2×3,2 мм. Общее количество ячеек 35 шт. Размер и форма ячейки сетки выбирается в зависимости от диаметра проволоки. Образец изготовлен из алюминиевого прутка марки АД1. Химический состав и механические свойства регламентируются ГОСТ 4784-97. Длина образца $L = 160$ мм, диаметр образца $d = 5,1$ мм.

Свивка образца осуществлялась на стальной стержень диаметром $D = 10$ мм с шагом $h = 70$ мм. Образец навивался на стержень с вращением вокруг собственной оси и оси стержня (рис. 2).

После свивки определяются параметры ячейки согласно методике предложенной П.О. Пашковым [5] (рис. 3)

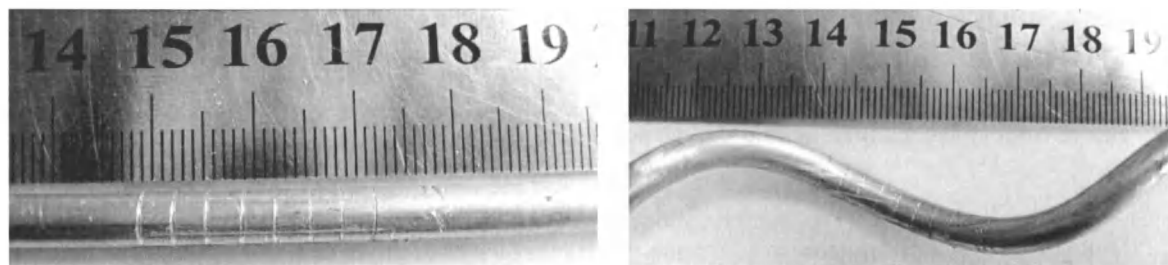


Рис. 2. Образец проволоки:
а – до свивки; б – после свивки

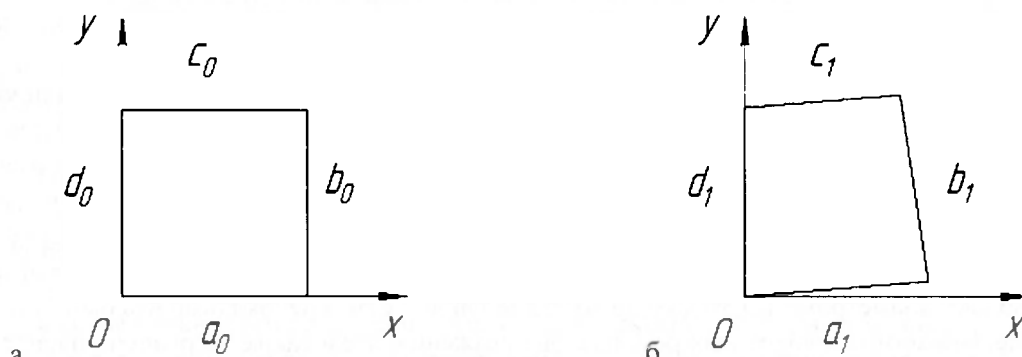


Рис. 3. Изменение формы ячейки делительной сетки при свивке:
Форма ячейки а – до свивки, б – после свивки a_0, b_0, c_0, d_0 – размеры ячейки до свивки; a_1, b_1, c_1, d_1 – размеры ячейки после свивки

По искажению сетки определялось интенсивность деформации проволоки ε на поверхности

$$\varepsilon_1 = \ln \left(\frac{a_0 + c_0}{a_1 + c_1} \right); \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \left(\frac{b_0 + d_0}{b_1 + d_1} \right); \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

где a_0, b_0, c_0, d_0 – размеры ячейки до свивки;
 a_1, b_1, c_1, d_1 – размеры ячейки после свивки;
 ε_1 – истинная деформация вдоль оси X ;
 ε_2 – истинная деформация вдоль оси Y .

Полученное методом делительных сеток значение ε сравнивались с расчетными методами: аналитический расчет, предложенный Б.А. Бирюковым и численный расчет с использованием МКЭ.

Определение деформации проволоки в процессе свивки осуществлялось тремя способами: аналитический расчет, численный расчет с использованием МКЭ, метод делительных сеток.

Для подтверждения адекватности результатов численного моделирования свивки произведена модельная свивка проволоки из сплава АД1. По аналогичным условиям с использованием численного моделирования МКЭ произведен расчет деформированного состояния проволоки. Форма модельного и виртуального образца в результате свивки представлена на рис. 4.

Представленные на рис. 4 модельный и виртуальный образцы обладают схожей формой и характером искажения делительной и конечно-элементной сетки, что свидетельствует о воз-

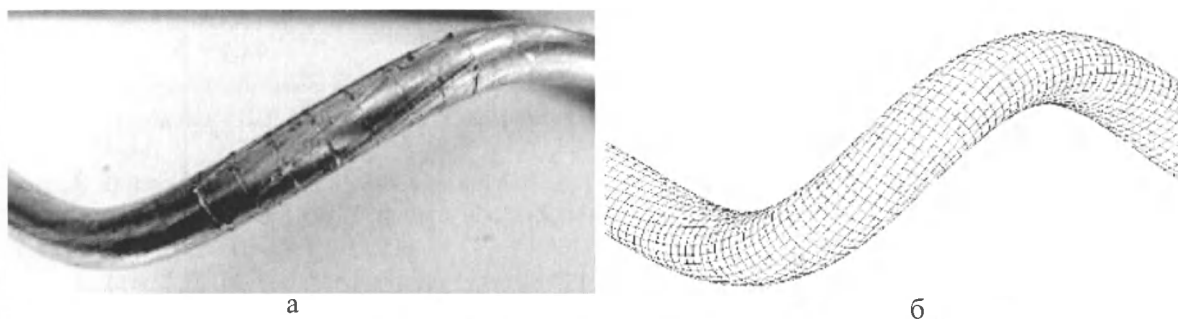


Рис. 4. Форма проволоки после свивки:
а – метод делительных сеток, б – метод конечных элементов

можном сравнении деформированного состояния. На рис.е 4 видны закручивающиеся в процессе свивки вокруг оси образца линии сетки. Это дополнительно подтверждает, что в процессе свивки проволока подвержена совместной деформации изгиба и кручения.

Для определения размеров были выбраны три ячейки расположенные в середине сетки и расположенные на внешней (ячейка 16) и внутренней (ячейка 20) стороне спирали, а также на боковой поверхности образца (ячейка 18). Результаты определения интенсивности деформации ϵ с использованием метода делительной сетки представлены в табл. 1.

Табл. 1

Результаты определения ДС методом делительных сеток

№ ячейки	Размеры ячейки (до свивки / после свивки)				Интенсивность деформации ϵ
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
16	3,2/3,8	3,2/3,3	3,2/3,7	3,2/3,3	0,203
18	3,2/3,4	3,2/3,3	3,2/3,5	3,2/3,4	0,122
20	3,2/3,4	3,2/3,5	3,2/3,8	3,2/3,9	0,268

Результаты определения деформированного состояния макетного образца, представленные в табл. 1 показывают, что в процессе свивки большей деформации подвержены внутренние (ячейка 20) и внешние (ячейка 16) поверхности спирали. Минимальная деформация наблюдается на боковой поверхности (ячейка 18) спирали.

Результаты модельной свивки с использование численного моделирования представлены на рис. 5.

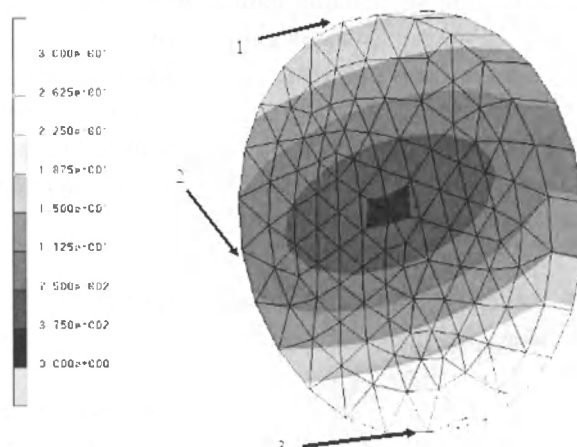


Рис. 5. Распределение интенсивности деформации ϵ в сечении виртуального образца:
Области ячеек в методе делительных сеток:

1 – область ячейки 16; 2 – область ячейки 18; 3 – область ячейки 20

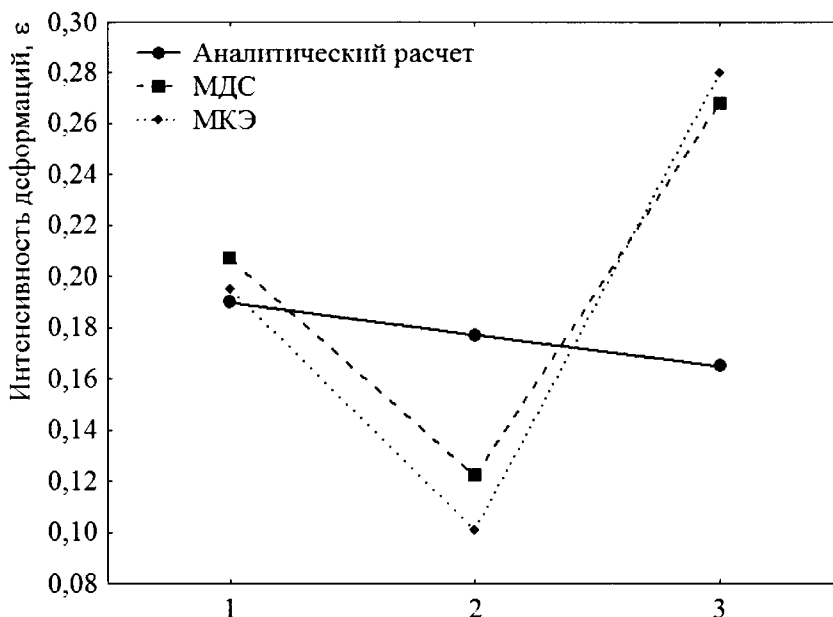


Рис. 6. Распределение интенсивности деформации ε на поверхности образца при модельной свивке: 1 – внешняя поверхность, 2 – боковая поверхность, 3 – внутренняя поверхность

На рис. 5 видно, что области максимальной деформации при модельной свивке виртуального образца, совпадают с расчетными значениями в ячейках 16 и 20 полученными МДС. Представленное на рис. 5 распределение интенсивности деформации ε соответствует представлениям о распространении деформации при изгибе с кручением.

Сравнение значений интенсивности деформации полученных с использованием аналитического расчета предложенного Б.А. Бирюковым, экспериментального метода делительных сеток и численного расчета с использованием МКЭ представлено на рис. 6.

Приведенные на рис. 6 графики распределения значений ε полученные МДС и МКЭ имеют хорошую сходимость. Расчет деформированного состояния аналитическим способом отражает среднее значение деформации по всему сечению и не может учитывать контактное взаимодействие между образцом и стержнем. Это вносит значительную погрешность при расчете деформации на внутренней поверхности спирали, т.е. в контактной зоне. Близкие значения деформации, полученные МДС при модельной свивке и МКЭ на всей поверхности спирали свидетельствует об адекватности численной модели свивки.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее приемлемым способом расчета $\varepsilon_{св}$ является метод конечных элементов. Этот метод наиболее точно отражает действительную картину деформации проволоки при свивке. Он не требует выполнения сложных экспериментальных работ и поэтому может быть широко использован для определения деформаций проволоки, в том числе сложных конструкциях металлокорда.

Список использованной литературы:

1. Цыбулина, А.А. Производство металлокорда / А.А. Цыбулина, А.К. Стариков. – Москва ; Металлургия, 1979. – 64 с.
2. Оценка вероятности обрыва высокоуглеродистой латунированной проволоки при свивке в металлокорд / Бобарикин Ю.Л., Авсейков С.В. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 3. Обработка металлов давлением / редколлегия: С.А. Астапчик (гл.ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. – 217 с. : ил. – с. 18-28.
3. Зависимость для расчета обрывности металлокорда в процессе свивки на канатных машинах

двойного кручения / Бобарикин Ю.Л., Авсейков С.В., Веденеев А.В. // *Литье и металлургия*. – 2014. – №3 спецвыпуск. – С. 66–69.

4. Снижение обрывности высокопрочной проволоки при свивке из нее металлокорда на машинах двойного кручения / Б.А. Бирюков, Ю.В. Феоктистов, А.В. Веденеев // *Литье и металлургия* – 2012. – №4. – С. 29–34.

5. Анализ деформаций элементов витых структур и их влияние на потери прочности при производстве металлокорда / А.В. Веденеев, А.С. Желтков, В.В. Филиппов // *Вести национальной академии наук Беларуси* – 2000. – №3. – С. 23– 27.

5. Дель, Г.Д. Метод делительных сеток / Г.Д. Дель, Н.А. Новиков – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с., ил.

6. Численное моделирование процесса свивки металлокорда с использованием метода конечных элементов / Ю.Л. Бобарикин, М.Н. Верещагин, С.В. Авсейков, А.В. Веденеев, Е.В. Шамановская // *Литье и металлургия* – 2012. – №3. – С.40–44.

Статья поступила в редакцию 15.04.2015