

УДК 621.833

**И.В. Хромов, доцент, канд. техн. наук***Севастопольский национальный технический университет**Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: i.v.khromov@sevntu.com.ua***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РИХТОВКИ СТАЛЬНОЙ КАНАТНОЙ ПРОВОЛОКИ С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ**

*Рассмотрена физическая модель процесса знакопеременного изгиба проволоки в рихтовальном устройстве. Предложена методика численного расчета напряженно-деформированного состояния и внутреннего изгибающего момента в поперечном сечении проволоки на различных этапах деформирования.*

**Ключевые слова:** рихтовальное устройство; нелинейное упрочнение; упругопластическая деформация; напряженно-деформированное состояние.

Одним из основных показателей качества при производстве металлических канатов и кабелей малого диаметра является прямолинейность, которая оценивается диаметром остаточной кривизны свободного отрезка готового изделия. Значение последнего параметра во многом зависит от начальной кривизны проволоки, используемой при свивке [1]. Для уменьшения кривизны и перераспределения технологических напряжений на производстве широко применяются различные методы механической обработки, к которым, в частности, относится операция рихтовки. При этом поиск оптимальных параметров деформирования – предмет многочисленных исследований в области проектирования технологических процессов сталеканатного производства [1-3, 7-10].

**Целью статьи** является разработка компьютерной методики расчета напряженно-деформированного состояния стальной канатной проволоки в процессе рихтовки с учетом действительной диаграммы растяжения.

**1. Назначение операции и физическая модель процесса.**

Рихтовка представляет собой многократный знакопеременный упругопластический изгиб стержневой заготовки на роликах рихтовального аппарата (рисунок 1). Этот вид обработки используется для обеспечения прямолинейности (выпрямления) стержневой заготовки, а также для перераспределения или снижения величины остаточных напряжений в готовом изделии.

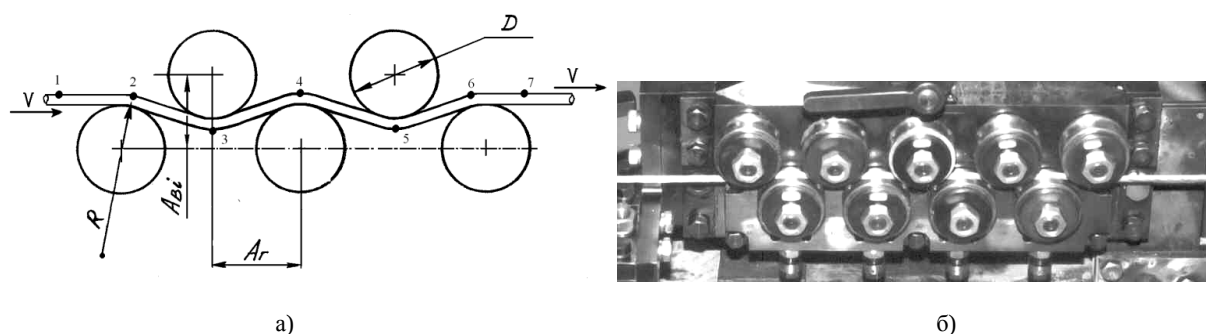


Рисунок 1 – Кинематическая схема процесса (а) и внешний вид устройства для рихтовки длинномерного изделия (б)

Теоретический анализ и расчет режимов настройки рихтователя (межцентровые расстояния роликов по горизонтали  $A_r$  и по вертикали  $A_b$ ) опирается на физическую модель процесса, графическая схема которой представлена на рисунке 2 в виде многоступенчатой диаграммы  $M_x(k)$ . При рихтовке стержень испытывает деформацию чистого изгиба. Однако, знакопеременный характер деформации приводит к значительному усложнению математической модели данного процесса.

Промежуточные положения произвольного поперечного сечения стержневой заготовки при ее движении вдоль рихтовального аппарата на рисунке 1, а отмечены точками 1, 2, ... 7. Соответствующие этим положениям напряженно-деформированные состояния поперечного сечения отмечены точками на рисунке 2, б. Отдельные этапы упругопластической деформации (линии 0–2, 2–3, 3–4, 4–5) описываются различными нелинейными интегральными функциями вида  $M_{x,i}(k_{i-1}, k)$ , где  $i$  – номер этапа деформации изгиба. На двух заключительных этапах (линии 5–6 и 6–7 по рисунку 2, б) диаграмма имеет линейный характер  $M_{x,5}(k_5, k)$ .

Физическая модель позволяет в данном случае записать неявное уравнение для определения неизвестных значений кривизны заготовки на четырех промежуточных этапах изгиба  $k_2, k_3, k_4, k_5$  из условия отсутствия остаточной кривизны готового изделия (условие прямолинейности)

$$M_7 = M_5(k_0, k_2, k_3, k_4, k_5) + M_{x,5}(k_5, k) = 0. \quad (1)$$

Недостающие соотношения между параметрами  $k_2, k_3, k_4, k_5$  могут быть установлены из кинематических и технологических условий задачи [2, 3, 7-10]. Ввиду неявной формы уравнения (1), математическое моделирование процесса сводится к поэтапному численному расчету и построению диаграммы по рисунку 2, б для варьируемого комплекта искомых параметров  $k_2, k_3, k_4, k_5$ . При этом алгоритм итерационной процедуры должен обеспечивать в конечном итоге выполнение условия (1). Таким образом, основная задача проектирования процесса рихтовки состоит в том, чтобы обеспечить отсутствие внутреннего изгибающего момента или остаточной кривизны в готовом изделии посредством нескольких этапов упругопластического знакопеременного изгиба стержневой заготовки.

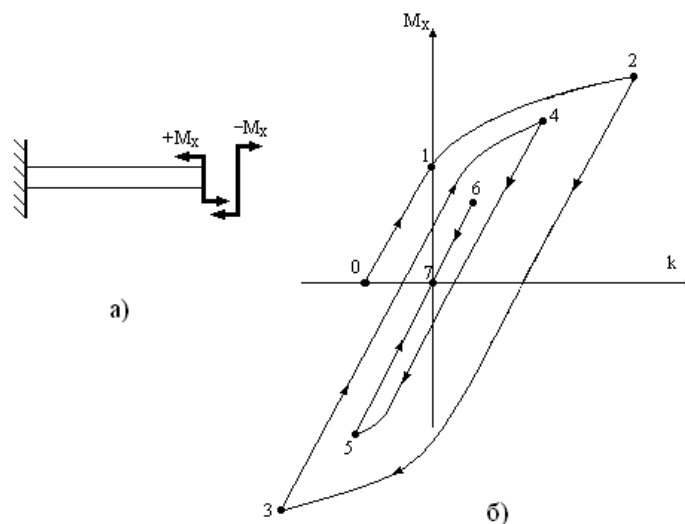


Рисунок 2 – Схема нагружения (а) и диаграмма деформации проволоки (б) в процессе рихтовки

## 2. Экспериментальная диаграмма растяжения стальной канатной проволоки, аппроксимирующая функция

Диаграммы растяжения и сдвига имеют фундаментальное значение не только для получения начальной информации о поведении материала при простых видах нагружения. Они также являются основой для построения математических моделей деформируемых тел произвольной конфигурации при любых видах сложного нагружения.

При дальнейшем моделировании использовалась реальная диаграмма растяжения стальной канатной проволоки диаметром  $d = 1,1$  мм и пределом прочности  $\sigma_B = 1750$  МПа, полученная в лаборатории Института обработки металлов давлением Фрайбергской горной академии (Германия). Как показано в [5], экспериментальную диаграмму растяжения стальной канатной проволоки целесообразно описывать комбинированной аналитической функцией вида

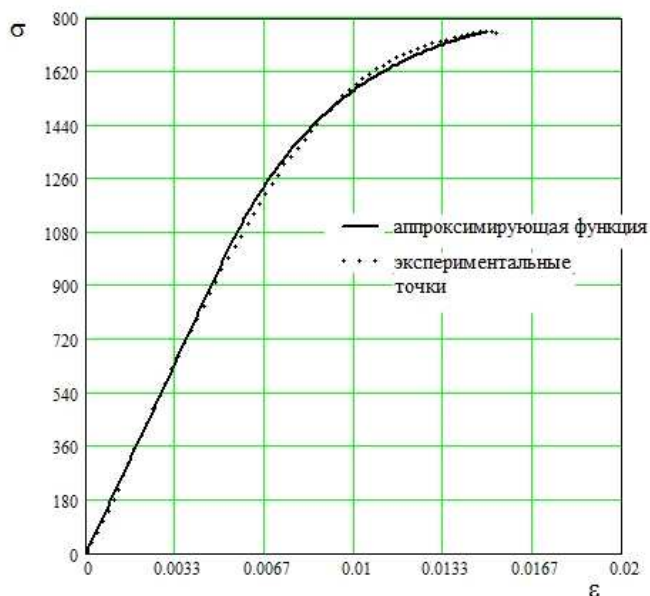


Рисунок 3 – Экспериментальная диаграмма растяжения и аппроксимирующая функция

$$\sigma(\epsilon) = if \left[ \epsilon < \epsilon_T, E \cdot \epsilon, \sigma_T \left[ 1 + b \left( 1 - a 3^{\left( \frac{\epsilon}{\epsilon_T} - 1 \right)} \right) \right] \right], \quad (2)$$

где  $a, b$  – константы, определяемые по трем базовым точкам экспериментальной диаграммы.

Как видно из рисунка 3, аппроксимирующая функция вида (2) практически полностью совпадает с экспериментальными точками диаграммы растяжения  $\sigma(\epsilon)$ .

### 3. Методика компьютерного моделирования процесса рихтовки

Согласно классификации, приведенной в [6], моделирование процесса рихтовки сводится к решению прямой задачи технологической механики стержня. При этом каждый из этапов деформации разбивается на большое количество шагов с малым приращением кривизны  $\Delta k$ . Алгоритм предусматривает многократный пошаговый расчет напряжений на основе унифицированной процедуры, описанной в [4] и внутреннего изгибающего момента по интегральной формуле

$$M_x = \int_F \sigma \cdot y \cdot dF. \quad (3)$$

Основное отличие процедуры пересчета напряжений в пластической стадии нагружения состоит в том, что в уравнениях течения учитывается нелинейное упрочнение материала. В этом случае модуль и коэффициент упрочнения зависят от накопленной интенсивности пластических деформаций и на произвольной стадии нагружения с учетом функции (2) определяются зависимостями

$$E'(\epsilon) = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \text{if} \left[ \epsilon < \epsilon_T, E, -E \cdot b \cdot \ln(a) \cdot a^{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_T} - 1\right)} \right], \quad (4)$$

$$\lambda(\epsilon) = \frac{E'(\epsilon)}{E} = \text{if} \left[ \epsilon < \epsilon_T, 1, -b \cdot \ln(a) \cdot a^{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_T} - 1\right)} \right]. \quad (5)$$

На рисунке 4 представлена блок-схема общего алгоритма. Он включает несколько однотипных,

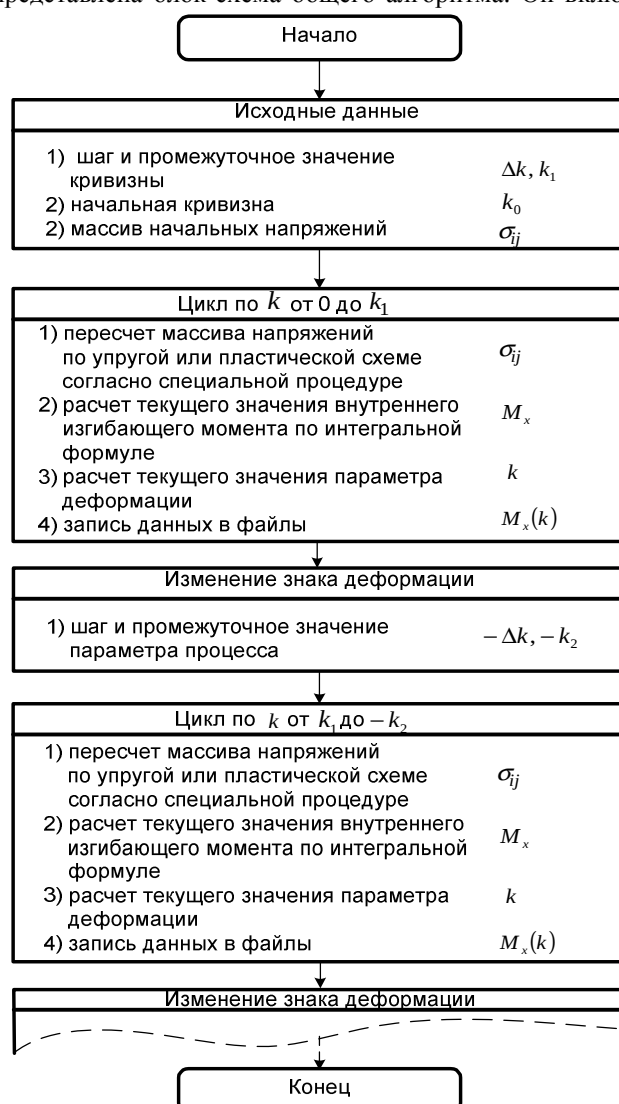


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма решения задачи о знакопеременном изгибе

последовательно выполняемых циклов, количество которых равно количеству этапов знакопеременного изгиба. В процессе расчета формируются файлы данных со значениями внутреннего изгибающего момента, кривизны, нормальных напряжений. После завершения работы программы указанные файлы могут считываться и обрабатываться с помощью встроенных функций в стандартных математических пакетах.

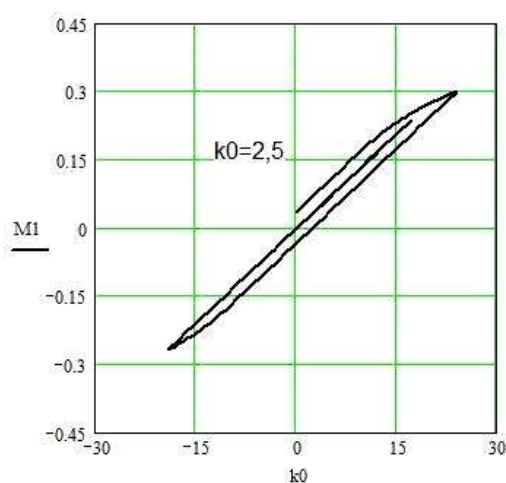
Пример результатов моделирования для процесса 4-х кратной рихтовки стальной проволоки диаметром  $d = 1,1$  мм показан на рисунках 5, 6. Расчеты и формирование необходимых файлов данных выполнялись для трех значений начальной кривизны проволоки ( $k_0 = 0$ ,  $k_0 = 2,5 \text{ м}^{-1}$ ,  $k_0 = 5 \text{ м}^{-1}$ ) с помощью специальной программы, написанной в среде Microsoft Visual Basic. Значения кривизны  $k_i$  в конце отдельных этапов рихтовки заранее неизвестны. Их необходимо выбрать из условия, чтобы внутренний изгибающий момент  $M_x$ , а значит и остаточная кривизна проволоки в конце процесса, были бы равны нулю при произвольной величине начальной кривизны  $k_0$ . В данном примере, как видно из рисунка 5, все графики функции  $M_x(k)$  сходятся к началу координат с достаточной для практики точностью.

#### Исследуемый процесс - 4-х кратный знакопеременный изгиб стержня

Диаметр стержня:  $d = 1,1$  мм

Файлы данных, полученные с помощью численных расчетов  
в VisualBasic (шаг разбиения  $\Delta \epsilon_3 = 0,05$ ):

```
- цикл деформации       $\epsilon_3 = (0 \ 2,5 \ -2 \ 1,8 \ 0)$ 
      при  $k_0 = 0$ , 1/м      при  $k_0 = 2,5$  1/м
- кривизна:              $k_0 := \text{READPRN}("k_0.pm")$    $k_1 := \text{READPRN}("k_1.pm")$ 
- изгибающий момент:     $M_0 := \text{READPRN}("M_0.pm")$    $M_1 := \text{READPRN}("M_1.pm")$ 
      при  $k_0 = 5$ , 1/м
- кривизна:              $k_2 := \text{READPRN}("k_2.pm")$ 
- изгибающий момент:     $M_2 := \text{READPRN}("M_2.pm")$ 
```



#### Графики расчетных функций $M(k)$

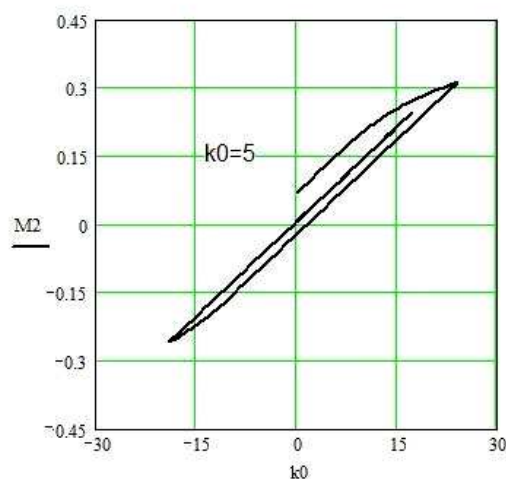
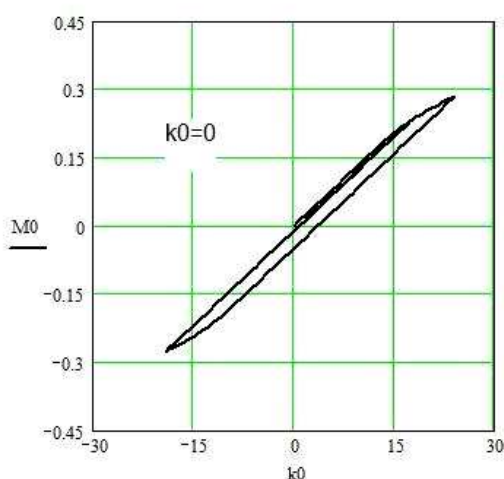


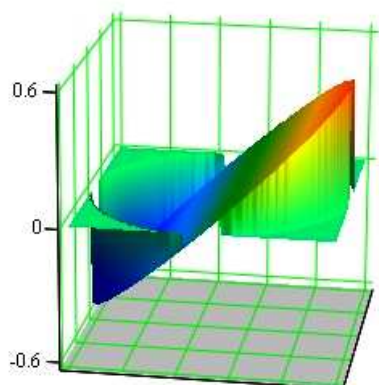
Рисунок 5 – Обработка файлов данных в Mathcad и построение зависимостей  $M_x(k)$  при трех значениях начальной кривизны

На рисунке 6 изображены трехмерные эпюры распределения напряжений  $\sigma(x, y)$  по поперечному сечению проволоки. Слева показаны начальные напряжения, когда криволинейная проволока на входе в рихтовальное устройство выпрямляется. Эпюра напряжений плоская, в наружных волокнах напряжения достигают максимальных значений. После рихтовки происходит перераспределение нормальных напряжений, эпюра напряжений принимает сложный вид, максимальные напряжения уменьшаются в 2-3 раза (рисунок 6, б).

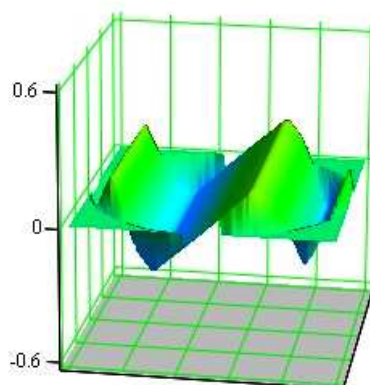
**Графики распределения напряжений  
в поперечном сечении стержня при  $k_0=5, 1/\text{м}$**

- начальные напряжения:  $\sigma := \text{READPRN}(\text{"si1.pm"})$

- остаточные напряжения:  $\sigma_0 := \text{READPRN}(\text{"si1o.pm"})$



а)



б)

Рисунок 6 – Графический анализ напряженного состояния проволоки на входе (а) и на выходе (б) из рихтовального устройства

**Вывод.** Разработанная методика позволяет уже на этапе проектирования технологического процесса выбрать необходимое количество циклов изгиба, основываясь на реальных свойствах материала, а также визуально оценить распределение напряжений в поперечном сечении проволоки на разных стадиях деформирования. В дальнейшем предполагается использовать элементы описанной методики при моделировании одной из перспективных операций механической обработки – вращающейся рихтовки.

**Библиографический список использованной литературы**

1. Исследования технологических методов и разработка вспомогательных устройств для изготовления прямолинейных канатов диаметром 1,25-3 мм: отчет о НИР (заключительный) / Мин-во образования и науки Украины, Севастоп. нац. техн. ун-т; рук. В.Г. Хромов; исполн.: И.В. Хромов, А.Ю. Даскалица, А.В. Белоусова, А.В. Хромова; нормоконтролер Г.М. Персидсков. — Севастополь, 2003. — 86 с.: ил. — Библиогр.: С. 79
2. Дородных Б.И. Метод расчета параметров настройки деформирующего приспособления при изготовлении канатов двойной свивки / Б.И.Дородных // Горный журнал. — М.: ИВУЗ, 1959. — № 9. — С. 60–66.
3. Туленков Ф.К. Изменение напряженного состояния проволоки в процессе рихтовки / Ф.К. Туленков // Стальные канаты. — К.: Техника, 1965. — Вып. 2. — С. 367–372.
4. Хромов И.В. Модификация метода Эйлера для решения дифференциальных уравнений пластического течения материала / И.В. Хромов // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2006. — Вып. 75. — С. 44–49.
5. Хромов И.В. Методика выбора параметров показательной функции для диаграммы растяжения стальной канатной проволоки / И.В. Хромов // Вестн. СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2008. — Вып. 87. — С. 12–15.
6. Хромов И.В. Классификация процессов пластической обработки стержневых заготовок с постоянной формой поперечного сечения / И.В.Хромов // Вестн. СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 106. — С. 31–34.
7. Guericke W. Modell zur Simulation elastisch-plastischer Biegeverformungen für technologische Bearbeitungsprozesse/ W. Guericke // Technische Mechanik / Ed. by Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. — 1994. — Band 14. — Heft 2. — S. 155–176.
8. Paech M. Roller straightening process and peripherals / M. Paech // Wire. — 2001. — № 2. — P. 76–82.
9. Lee J.-S. Design optimization of roller straightening process for steel cord using response surface methodology / J.-S. Lee, H. Huh, J.-Gu Bae, J.-W. Lee, D.-T. Kim // Proceedings of NUMIFORM '07, Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications. — 2007. — P. 581–586.

10. Guericke W. Material model describing cyclic elastic-plastic deformation of roller levelling and straightening processes / W. Guericke // Steel Research International. — 2009. — V. 80. — № 4. — P. 281–287.

*Поступила в редакцію 28.02.2012 з.*

**Хромов І.В. Моделювання процесу рихтування сталевих канатних дротів з врахуванням експериментальної діаграми розтягування**

Розглянуто фізичну модель процесу знакозмінного вигину дроту в рихтувальному пристрої. Запропонована методика чисельного розрахунку напружено-деформованого стану та внутрішнього згинаючого моменту в поперечному перерізі дроту на різних етапах деформування.

**Ключові слова:** рихтувальний пристрій, нелінійне зміцнення, пружно-пластична деформація, напружено-деформований стан.

**Khromov I.V. Simulation of the wire straightening process taking into account experimental stress-strain diagram**

A physical model of alternating wire bending in a straightener is considered. Computer methodology has been developed to calculate deflected mode and internal bending moment in a cross section of a wire at the different stage of deformation.

**Keywords:** straightener, nonlinear hardening, elastic-plastic deformation, deflected mode.