

УДК 621.833

Е.В. Хромов, доцент, канд. техн. наук,

В.В. Леонтьев, доцент, канд. техн. наук,

А.В. Быкова, инженер,

В.Г. Хромов, профессор, д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

КОНФИГУРАТОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

Приведены результаты исследований по совершенствованию методов моделирования технологического оборудования сталеканатного производства с использованием концепции системного проектирования.

Ключевые слова: *системное проектирование, моделирование, конфигуратор, технологическая механика, технологическое оборудование, преформатор, стальной канат.*

Методы (методы системотехники) в настоящее время используются не только при создании сложных автоматизированных систем управления, но и для разработки новых технических объектов различного назначения [1,2]. В основе практической реализации системной концепции проектирования лежит многогранное отображение (моделирование) технического объекта с использованием текстовых, аналитических, цифровых, графических и других средств обработки накопленной информации. Набор моделей, необходимых для адекватного описания содержания (свойств) объекта, его внутренних связей и связей с окружающей средой называют конфигуратором [2,3]. Эффективность применения системной концепции проектирования зависит, прежде всего, от полноты и степени совершенства конфигулятора. Анализ публикаций показывает, что применение методов системотехники сохраняет свою актуальность для различных сфер машиностроения, в том числе при решении задач модернизации технологического оборудования канатных заводов.

Целью исследований является разработка конфигулятора технологических устройств для предварительной деформации стальных канатов.

Стальной канат представляет собой множество спиралевидных стержневых заготовок (проволок или прядей), навитых на общий цилиндрический сердечник. Важным показателем качества, влияющего на долговечность каната, является степень предварительной деформации изгиба его элементов $\psi = \frac{D_c}{D}$

(D_c – диаметр цилиндра, описанного вокруг свободного спиралевидного элемента, выплетенного из каната; D – диаметр цилиндра, описанного вокруг спиралевидного элемента, находящегося в канате). Для обеспечения заданных значений диаметра спиралевидных элементов D_c и показателя ψ применяются специальные устройства для предварительной деформации изгиба элементов каната – преформаторы [4]. Исследования, связанные с созданием новых образцов преформаторов, являются составной частью многолетних работ кафедры технической механики и машиноведения СевНТУ, выполняемых по заказам и совместно с канатными заводами. Обобщенные результаты исследовательских и проектных работ послужили основой для создания конфигулятора преформаторов.

Особенность построения конфигулятора технологических устройств заключается в необходимости моделирования не только самого устройства, но и технологического процесса, реализуемого с помощью проектируемого устройства. В данной работе излагается структура и принципы построения следующих шести базовых моделей конфигулятора:

1) функциональная модель отображает назначение и структуру преформатора, а также рабочее пространство для его размещения на конкретной канатовьюющей машине;

2) кинематическая модель преформатора отображает схему и минимально необходимый набор движений или перемещений рабочих элементов преформатора и заготовки, необходимых для реализации функциональной модели;

3) аналитическая модель реализуемого в преформаторе технологического процесса (процесс формоизменений прямолинейных заготовок) включает набор математических соотношений, описывающих взаимосвязь регулируемых параметров настройки с внутренними силовыми факторами и параметрами деформации стальных заготовок;

4) цифровая модель технологического процесса отражает количественную связь параметров настройки с геометрическими и механическими характеристиками планируемого к производству перечня канатов;

5) 3D-модель преформатора – это компьютерное пространственное изображение преформатора в сборе и всех его элементов в отдельности;

6) силовая модель устройства отражает величину и характер распределения сил, действующих между отдельными деталями преформатора и внутри несущих элементов.

Рассмотрим подробно содержание отдельных моделей конфигулятора.

Функциональная модель преформатора включает общую схему (рисунок 1) и объемную структурную схему с привязкой к ротору конкретной канатобьющей машины (рисунок 2). Из рисунка 1 видно, что устройство предназначено для реализации синхронного упругопластического формоизменения нескольких длинномерных заготовок, т.е. первоначально прямолинейная ось каждой заготовки на выходе из преформатора принимает форму винтовой линии с заданными параметрами H, D_c (шаг и наружный диаметр спиралевидного элемента). Указанная технологическая операция выполняется перед укладкой винтовых элементов на сердечник (перед конусом свивки). Из анализа общей схемы следует, что преформатор должен включать набор (по количеству свиваемых элементов) одинаковых инструментальных блоков, расположенных симметрично относительно оси свиваемого каната. При этом каждый инструментальный блок должен обеспечивать возможность плавной регулировки параметров винтовой оси заготовки в заданном диапазоне.

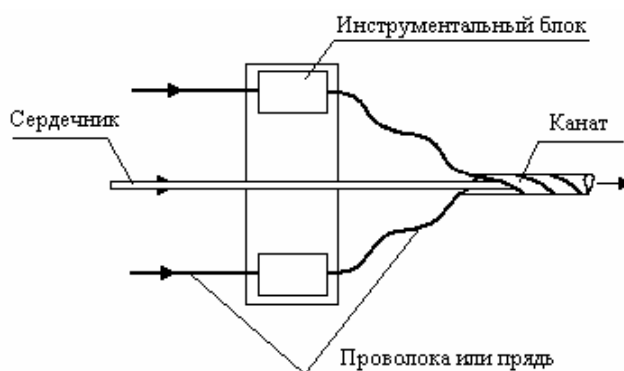


Рисунок 1 – Общая функциональная схема преформатора

Вторая часть функциональной модели включает компьютерную объемную структурную схему преформатора, в которой отражены: концевая часть ротора заданной канатобьющей машины (место крепления преформатора), фундаментная рама машины и рабочее пространство для размещения проектируемого объекта (рисунок 2). На основании объемной схемы при заданном количестве элементов каната определяются предельно допустимые размеры рабочего пространства для отдельного инструментального блока.

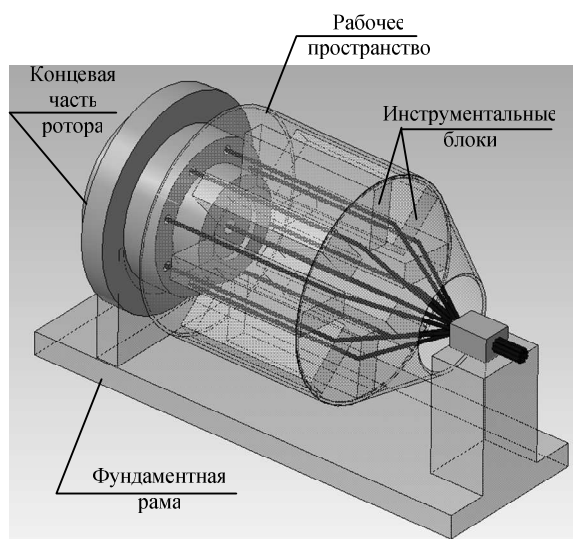


Рисунок 2 – Объемная структурная схема преформатора для конкретных типов каната и свивающей машины

Основная задача, которая решалась при разработке описанной модели, заключалась в создании базы данных 3D-структурных схем для применяемых на отечественных заводах свивающих машин и выпускаемых типов стальных канатов.

Кинематическая модель преформатора графически представлена схемой на рисунке 3. В данном случае каждый инструментальный блок преформатора (условно показан только один блок) выполнен в виде трех роликов, установленных с возможностью вращения вокруг параллельных осей на общем основании (кассетная конструкция). Первоначально прямолинейная заготовка подается с питающей катушки канатной машины, проходит через систему трех рабочих органов и поступает в зону свивки. За счет принудительной навивки на сердечник и вращения питающей катушки заготовка совершает винтовое движение относительно рабочих роликов, подвергается упругопластическому изгибу и за счет этого на выходе приобретает спиралевидную форму. Для обеспечения регулировки выходных параметров спирали два крайних ролика должны быть установлены с возможностью относительного перемещения Δ_1 , а центральный ролик – с возможностью вертикального перемещения Δ_2 по отношению к крайним роликам. В принципе возможны и другие варианты кинематической модели [4], рассмотрение которых выходит за рамки данной статьи.

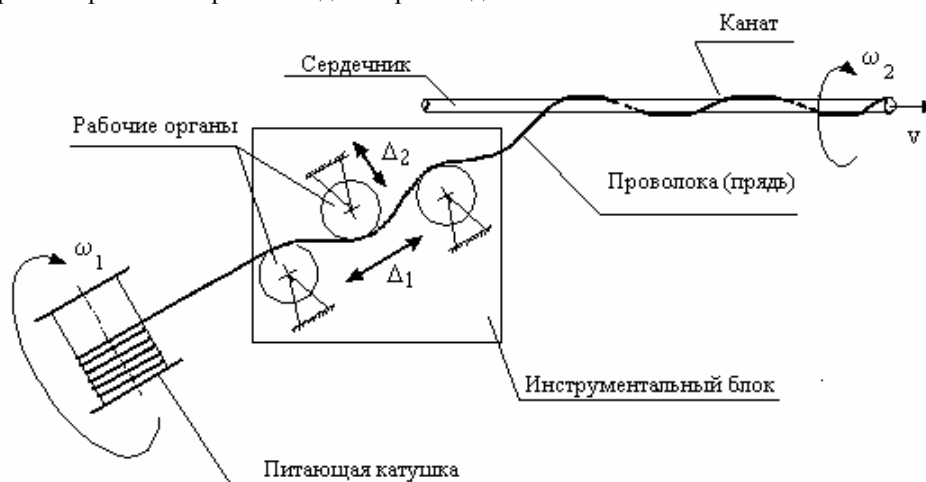


Рисунок 3 – Схема кинематической модели преформатора

Аналитическая модель реализуемого в преформаторе процесса формоизменения заготовки построена на основе понятий и уравнений механики упругопластического стержня (технологическая механика). Расчетная схема и диаграммы исследуемого процесса представлены на рисунке 4. В первом приближении можно полагать, что заготовка испытывает деформацию чистого изгиба (рисунок 4, а). Базовыми геометрическими параметрами проектируемого инструментального блока являются: рабочий диаметр роликов преформатора D_p , межцентровое расстояние крайних роликов по горизонтали A_r , межцентровое расстояние роликов по вертикали A_b . Для определения этих параметров необходима система уравнений, устанавливающая связь характеристик процесса преформации с геометрическими и механическими свойствами заготовки.

Исходным пунктом для моделирования процесса изгиба является зависимость внутреннего изгибающего момента от кривизны проволоки $M(k)$. В общем случае данная зависимость является неоднозначной. Это показано графически на рисунке 4, б. Здесь процесс упругопластического нагружения проволоки в зоне центрального ролика (линия 0-1) описывается нелинейной интегральной функцией

$$M(k) = \int_F \sigma(d, E, \sigma_B, k, y) \cdot y \cdot dF, \quad (1)$$

а процесс упругой разгрузки на выходе из преформатора (линия 1-2) – линейной функцией $M = E \cdot I \cdot (k - k_c)$ (где: d, E, σ_B, I – диаметр, модуль упругости, предел прочности и осевой момент инерции проволоки, соответственно; k_c – заданное значение остаточной кривизны готовой спирали).

Интегральная зависимость (1) может быть записана в явном виде на основе выбора конкретного вида аппроксимирующей функции $\sigma(\epsilon)$, описывающей экспериментальную диаграмму растяжения стальной проволоки. В зависимости от требований к точности расчетов используют линейную или нелинейную функции [5]. После этого можно записать уравнение для определения необходимой

начальной кривизны изгиба проволоки k_n в преформаторе по заданной остаточной кривизне проволоки на выходе k_c

$$M_{\max} = \int_F \sigma(d, E, \sigma_B, k_n, y) \cdot y \cdot dF = E \cdot I \cdot (k_n - k_c). \quad (2)$$

Далее при заданном перечне обрабатываемых канатов можно получить неравенство для выбора диаметра рабочих роликов преформатора $D_p \leq \frac{2}{(k_n)_{\max}}$.

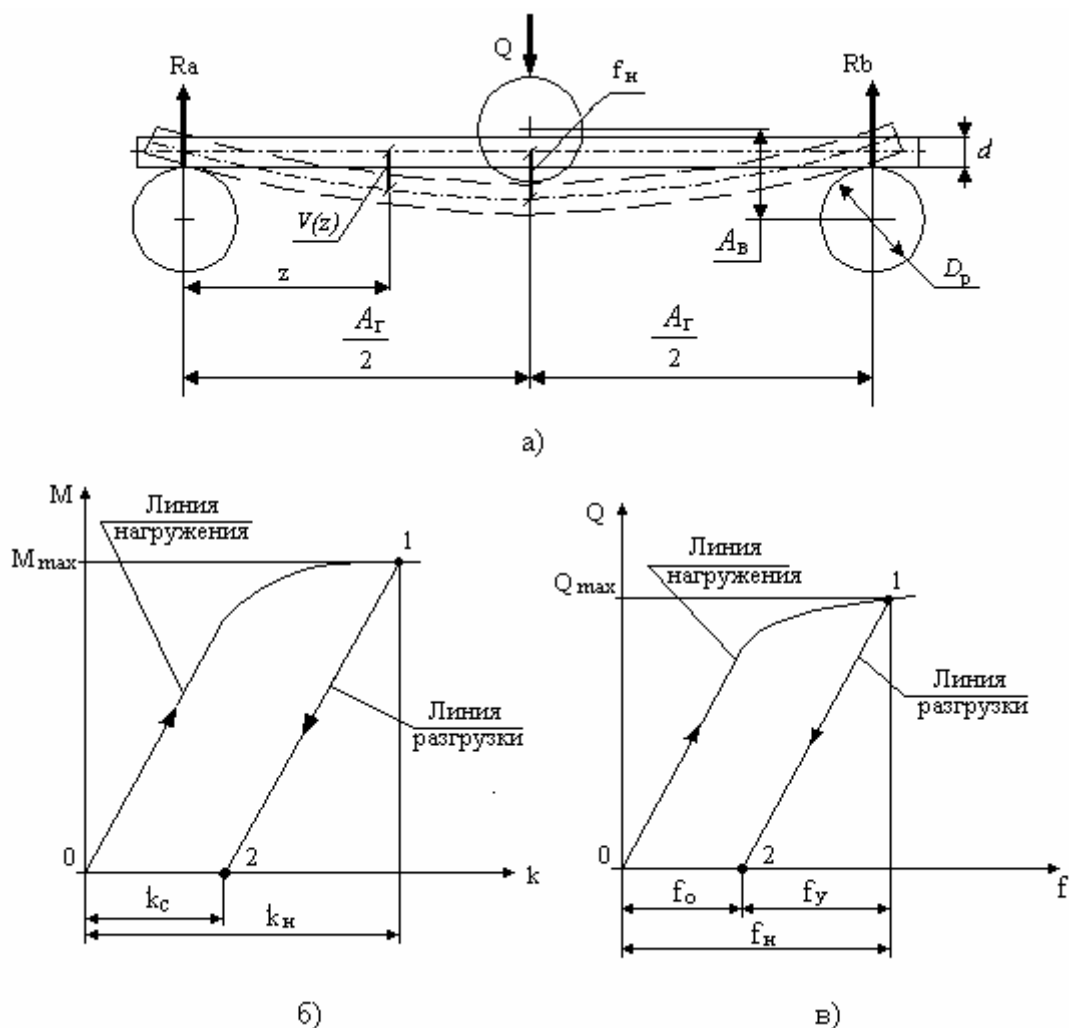


Рисунок 4 – Схема и диаграммы процесса формоизменения заготовки

Межцентровое расстояние по горизонтали для двух крайних роликов зависит от шага свивки каната H и назначается из опытных соображений в диапазоне $A_r = (0,8 \div 1,3) \cdot H$. Для вертикального межцентрового расстояния A_B из анализа схемы на рисунке 3а можно получить простую формулу

$$A_B = D_p + d - f_n, \quad (3)$$

где f_n – неизвестный начальный прогиб проволоки в зоне центрального ролика.

Расчет прогиба f_n представляет наиболее сложную часть рассматриваемой аналитической модели. Здесь на основании (1) необходимо получить обратную зависимость $k = k(d, E, \sigma_B, M) = k(d, E, \sigma_B, \frac{Q \cdot z}{2})$, где $M = \frac{Q \cdot z}{2}$ – внутренний изгибающий момент в произвольном сечении проволоки с координатой z , Q – поперечная сила на центральном ролике.

Изогнутая ось проволоки описывается дифференциальным уравнением

$$k = \frac{d^2 V}{dz^2} = k(d, E, \sigma_B, \frac{Q \cdot z}{2}) . \quad (4)$$

Решая это уравнение при граничных условиях $V(0) = V(A_T) = 0$, можно получить функцию для прогиба проволоки в зоне центрального ролика $f = V(\frac{A_T}{2}) = f(d, E, \sigma_B, Q, A_T)$ и обратную функцию для поперечной силы $Q(d, E, \sigma_B, A_T, f)$ [6].

Последняя функция описывает линию нагружения 0-1 на диаграмме по рисунку 4в. Линия упругой разгрузки 1-2 описывается линейной функцией $Q = G(f - f_0)$, где G коэффициент изгибной жесткости проволоки при упругой деформации. Теперь можно записать уравнение для расчета начального прогиба f_0 по заданной величине остаточного прогиба f_H

$$Q_{\max} = Q(d, E, \sigma_B, A_T, f_H) = G(f_H - f_0) . \quad (5)$$

Формулы и уравнения (1) – (5) отражают общую схему, на основании которой и была разработана подробная аналитическая модель исследуемого процесса с использованием последних достижений механики упругопластического стержня [7].

Цифровая модель технологического процесса устанавливает количественную связь указанных выше параметров инструментального блока D_p, A_B, A_T с геометрическими и механическими характеристиками планируемого к производству перечня канатов. Модель реализована в виде специальной компьютерной программы «Преформация» на базе операционной среды семейства Windows [7]. На рисунке 5 показан фрагмент пользовательского интерфейса программы.

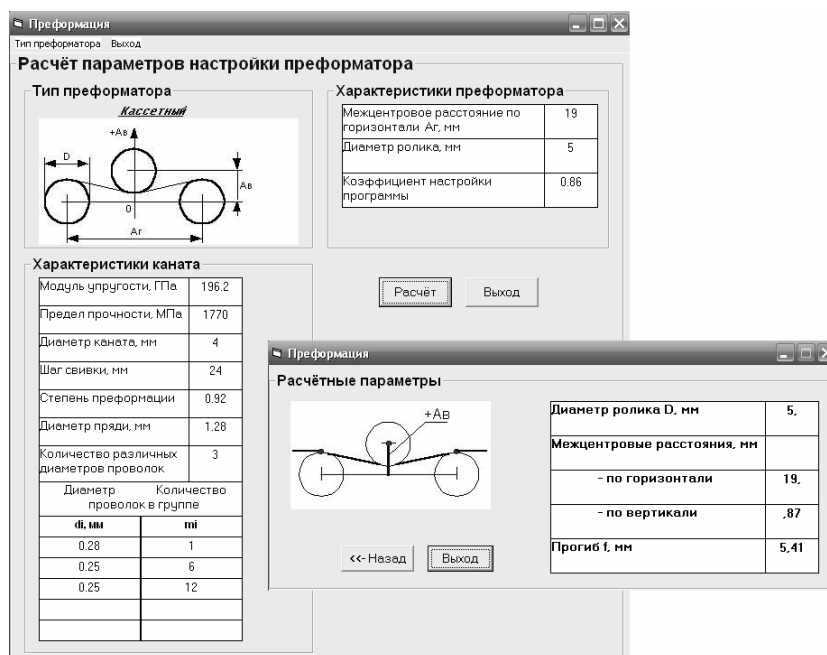


Рисунок 5 – Фрагмент интерфейса программы «Преформация»

Расширенная версия программы, кроме указанной выше основной задачи, позволяет также рассчитывать силы взаимодействия заготовки с рабочими органами преформатора и вытяжным механизмом свивающей машины. На основании многочисленных лабораторных и промышленных экспериментов установлено, что погрешность полученных с помощью созданной модели расчетных данных не превышает (5-20) %.

3D-модель преформатора создается с помощью средств компьютерной графики и обеспечивает максимально достижимую на сегодняшний день эффективность проектных работ. Преформатор отображается здесь, как твердотельная система, состоящая из множества соединенных между собой деталей (рисунок 6).

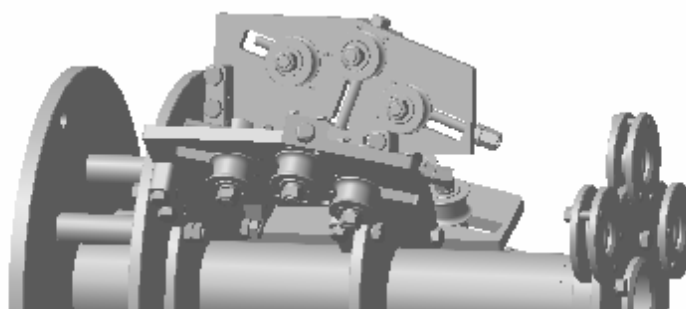


Рисунок 6 – Фрагмент 3D-модели шестикассетного преформатора с рабочим диаметром ролика 36 мм

При создании 3D-модели решается многоцелевая задача поиска такой комбинации деталей, геометрическая форма и способы соединения которых позволяют реализовать все требования функциональной, кинематической и цифровой моделей. Кроме этого необходимо обеспечить оптимальное соотношение показателей прочности, долговечности, будущих затрат на изготовление и эксплуатацию изделия. Алгоритм построения модели основан на использовании метода последовательных приближений и не поддается строгому формальному описанию. Другими словами, 3D-модель преформатора, по сравнению с рассмотренными выше моделями, не может рассматриваться, как некоторый универсальный инструмент, пригодный для автоматического выполнения проекта с любыми исходными данными.

Ввиду многообразия типоразмеров стальных канатов и применяемых свивающих машин рассматриваемый вид модели, по сути, представляет собой постоянно развивающуюся графическую базу данных. Особенность этой базы состоит в том, что она не может иметь широкого распространения и носит узкоспециализированный характер.

Силовая модель устройства отражает величину и характер распределения сил, действующих на границах между отдельными элементами преформатора и внутри несущих элементов. В качестве исходных силовых параметров здесь используются результаты предыдущего цифрового моделирования процесса взаимодействия заготовки с рабочими органами преформатора. Кроме того, преформатор исследуется здесь, как часть более общей системы – канатовьюющей машины. Вместе с ротором канатной машины несущие элементы преформатора подвергаются воздействию больших центробежных сил. Для анализа напряженно-деформированного состояния используется метод конечных элементов и специальные прикладные программы [9]. На этой стадии успешно применяется графическая база данных, создаваемая в процессе предыдущего этапа 3D-моделирования. Результаты силового анализа представляются в виде плоских или объемных схем распределения напряжений или деформаций.

На основе разработанных моделей конфигуратора была создана первоначальная база данных, включающая несколько новых проектов преформаторов. Успешно выполненный ряд заказов для канатных заводов подтвердил эффективность применения системной концепции проектирования в рассматриваемой отрасли промышленности.

Вывод. Разработанный конфигуратор технологических устройств для предварительной деформации стальных канатов открывает дополнительные возможности для эффективной модернизации оборудования отечественных канатных заводов.

В перспективе, как сам конфигуратор, так и порождаемая с его помощью база данных могут совершенствоваться, расширяться и трансформироваться в базу знаний, позволяющих находить оптимальные решения проблемных вопросов технологии сталеканатного производства. Это и является предметом дальнейших работ в указанном направлении.

Библиографический список

1. Гуд Г.Х. Системотехника / Г.Х. Гуд, Р.Э. Маккол. — М.: Сов. радио, 1962. — 256 с.
2. Фролов К.В. Системная концепция и алгоритмы проектирования механизмов произвольной структуры / К.В. Фролов, В.П. Прохоров // Тр. всемирного конгр. по ТММ. — Оулу, Финляндия, 1999. — Т. 2. — С. 689–694.
3. Прохорова Н.И. Модель конфигуратора приводов с винтовым движением. / Н.И. Прохорова, В.П. Прохоров // Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем и элементов их конструкций: матер. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, сент. 2008 г. — Севастополь, 2008. — С. 404–409.
4. Букштейн М.А. Производство и использование стальных канатов / М.А. Букштейн. — М.: Металлургия, 1973. — 360 с.

5. Хромов В.Г. Выбор аппроксимирующей функции для диаграммы растяжения материала в задачах технологической механики стержня / В.Г. Хромов, И.В. Хромов // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2007. — Вып. 80. — С. 20–22.

6. Хромов В.Г. Механика процесса холодной упругопластической деформации стержня: учеб. пособие / В.Г. Хромов. — К.: УМК ВО, 1990. — 50 с.

7. Хромов И.В. Технологическая механика стальных канатов. Практическое применение. Пути развития / И.В. Хромов // Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем и элементов их конструкций: матер. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 8-10 сент. 2008 г. — Севастополь, 2008. — С. 259–263.

9. Хромов В.Г. Применение метода конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния элементов скоростного технологического оборудования / В.Г. Хромов, В.В. Леонтьев // Расчет и конструирование элементов подъемно-транспортного оборудования: тез. докл. межотраслевой науч.-техн. конф., Севастополь, 10-12 окт. 1993 г. — Севастополь, 1993. — С. 12.

Поступила в редакцию 15.02.2010 г.