



# **ВІСНИК**

**Східноукраїнського  
національного  
університету  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

---

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

**№11(93)  
2005**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

# ВІСНИК

Східноукраїнського  
національного університету  
імені Володимира Даля  
№ 11(93)

технічні науки

Луганськ – 2005

Вітенько Т.М., Волікова Н.М. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ СУХОГО МОЛОКА В УМОВАХ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ .....	113
Афукова Н.О. РОЗРОБКА НОВИХ ПРОДУКТІВ З ДИКОРОСЛОЇ СИРОВИНИ.....	118
Постнов Г.М. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ЯКОСТІ БУЛЬЙОНУ З АНАТОМІЧНИХ ЧАСТИН СТАВКОВОЇ РИБИ .....	122
Мирончук В.Г. ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА МАСОВОГО ЗАРОДЖЕННЯ КРИСТАЛІВ ЦУКРОЗИ .....	126
Ніколаєнко В.Ф., Істомін Л.Ф., Фоміна Н.Л. РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ ХАРЧОВОГО ВИРОБНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ....	129
Чернецкая Н.Б. ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГИДРОСМЕСЬЮ.....	137
Монахов Р. Ф., Иващенко Е. А., Васильевич В. Г. О ВЫБОРЕ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В РАСЧЕТАХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	140
Палаш Р.В., Дзюбик А.Р. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НЕРОЗНІМНИХ З'ЄДНАНЬ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ .....	144
Бранспиз Е.В., Морнева М.О., Бранспиз М.Ю., Булгаков А.С. К ОБОСНОВАНИЮ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СЫПУЧЕГО ГРУЗА, ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ЛЕНТОЧНЫМ КОНВЕЙЕРОМ .....	148
Губачева Л.А., Сладковский А. АНАЛИЗ СИЛОВОГО РЕЖИМА ПРОЦЕССА ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ .....	152
Заплетников И.Н., Жидков Ю.В., Божок И.С. ВИБРОАКУСТИКА МАШИН ОЧИСТКИ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ С ПЕРФОРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ.....	158
Кондауров Е.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ <i>SIMULINK</i> ® .....	161

Губачева Л.А., Сладковский А.

**АНАЛИЗ СИЛОВОГО РЕЖИМА ПРОЦЕССА  
ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ**

Рассмотрено моделирование технологического процесса и расчет силового режима двухугловой П-образной гибки толстолистовой заготовки. Рис. 6. Ист. 5.

Первостепенное значение для повышения ресурсосбережения при обработке металлов давлением приобретает интенсификация производства, дальнейшее развитие и внедрение в производство прогрессивной, научно обоснованной технологии холодной штамповки, путем совершенствования технологических процессов с использованием компьютерного моделирования.

Изготовление заготовок деталей типа втулок производят гибкой цилиндрических заготовок на прессах. Технология изготовления включает разрезку листа или ленты на прямоугольные карточки и их гибку до получения цилиндрической заготовки в несколько переходов [1]

Для получения П-образных (или им подобных) деталей за один ход пресса листовую заготовку необходимо изгибать одновременно в двух разных поперечных сечениях. Особенности двухугловой гибки заключаются в том, что между боковыми вертикальными гранями пуансона и матрицы имеется зазор (рис. 1), который не изменяется в процессе гибки, а также в том, что участок заготовки, находящийся под горизонтальной гранью пуансона, отходит от нее и выпучивается (рис. 5). Кроме того, только на начальном этапе деформации внешние силы приложены к заготовке в двух точках контакта ее с пуансоном. При этом, плечо гибки существенно уменьшается по сравнению с одноугловой гибкой, но деформирующее усилие, необходимое для двухугловой гибки, изменяется по мере опускания пуансона [2].

Для моделирования гибки толстолистовой заготовки предложена схема нагружения, показанная на рис. 1.

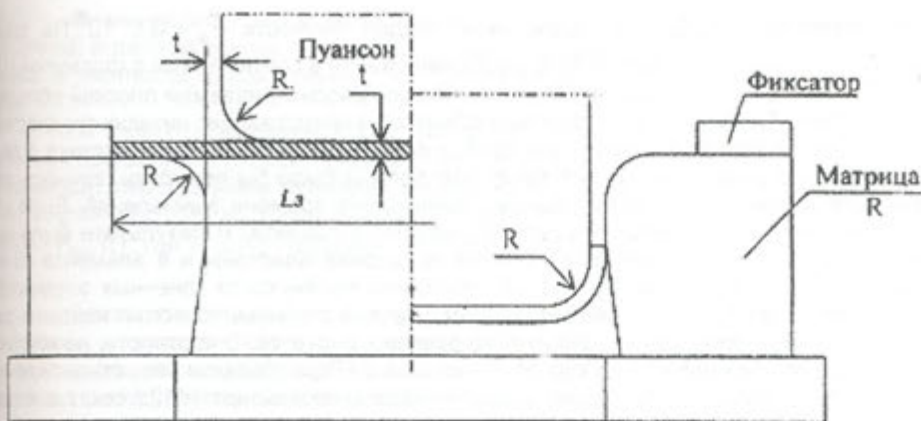


Рис. 1. Схема двухугольной гибки

Заготовка представляет собою пластину постоянной толщины 10 мм, длина которой (перпендикулярно к плоскости чертежа на рис. 1) была равна 222 мм, а ширина могла быть различной, но отличаться не намного в пределах от 248 до 251, 5 мм. Материал заготовки сталь 45, для которой диаграмма растяжения  $\sigma - \epsilon$  была аппроксимирована математической зависимостью [3]:

$$\sigma(\epsilon) = 350 + 790 \cdot \epsilon^{0.48}, \quad (1)$$

где напряжения измеряются в МПа. Такая постановка задачи предполагает три существенные нелинейности [4;5]. Во-первых, изначально предполагается, что заготовка будет иметь большие пластические деформации. Во-вторых, рассматриваемые точки заготовки будут иметь большие перемещения, т.е. линейризованные соотношения Коши будут неприемлемы. И, наконец, рассматриваемая задача относится к классу контактных, имеющих несколько контактных зон с заранее неопределенной границей. Совокупность указанных факторов определяет выбор инструментария для решения такой задачи. Очевидно, что даже при использовании численных методов, таких как метод конечных элементов (МКЭ), не каждый из существующих в настоящее время пакетов прикладных программ может осилить решение задачи в такой постановке. Этим определяется выбор пакета MSC.MARC 2003 в качестве основного инструмента решения задачи. Указанный пакет предназначен для решения задач моделирования МКЭ физических процессов с существенной нелинейностью.

Процесс решения задачи состоит из нескольких этапов.

**Первый этап** – это задание модели деформируемого объекта. Этот этап включает такие шаги:

- задание геометрии деформируемого твердого тела,
- задание его механических характеристик,
- генерация конечно-элементной сетки.

Очевидно, что рассматриваемый объект имеет достаточно простую геометрию, и ее задание не составляет никаких проблем. В силу достаточно большой длины объекта и постоянных условий его нагружения по длине можно отнести эту задачу к классу плоской деформации. Тогда при задании геометрии достаточно ввести геометрию поперечного сечения (прямоугольник), а длину объекта указать отдельным параметром задачи плоского деформирования.

Задание механических характеристик более сложно. Помимо задания чисто упругих характеристик, которые были выбраны общепринятыми (модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ) задаются пластические характеристики

ки. Последние были выбраны следующими: предел текучести  $\sigma_s = 3,5 \cdot 10^8$  Па, зависимость  $\sigma - \epsilon$  на этапе пластического деформирования в соответствии с формулой (1).

И последнее – это выбор КЭ дискретизации рассматриваемой плоской области. Создание самой сетки для столь простого объекта не представляет никаких трудностей, но густота сетки является достаточно проблематичным вопросом. Это связано с тем, что очевидное стремление сгустить сетку, что должно было бы повысить точность решения задачи, приводит к значительному увеличению времени вычислений. Было исследовано несколько КЭ моделей рассматриваемого объекта. В результате была выбрана КЭ сетка, содержащая 80 элементов по ширине пластины и 4 элемента по ее толщине. Такой выбор сетки обеспечил отсутствие вытянутости конечных элементов, что негативно влияет на точность решения, а с другой стороны, позволил находить решение в течение сравнительно небольшого времени расчетов. В частности, на компьютере с процессором Pentium IV с тактовой частотой 2 ГГц и объемом оперативной памяти 1 Мб полное процессорное время решения задачи составляет 16128 сек, т.е. около пяти часов.

**Вторым этапом** моделирования является задание граничных и начальных условий.

Рис. 2 позволяет более подробно проанализировать заданную геометрию. Рассматриваемый деформируемый объект имеет название Plate. На рисунке показана его КЭ сетка. Пуансон задается как жесткое тело с названием Top. Для его задания, использованы несколько отрезков и дуг. Характерные точки T1, T2, T3 имеют координаты (0.096;0.06), (0.096;0.044), (0.062;0.01), соответственно. Все координаты здесь и далее задаются в метрах, а радиусы дуг соответствуют приведенным на рис. 1. Аналогично задаются правая и левая стороны штампа, которые имеют очевидные названия Right и Left. Они симметричны, поэтому информации о координатах характерных точек L1 – L6 правой стороны штампа достаточно для построения всей геометрии. А указанные точки имеют координаты (0.126;0.02), (0.126;0), (0.116;0), (0.106;-0.01), (0.106;-0.02), (0.107;-0.06), соответственно.

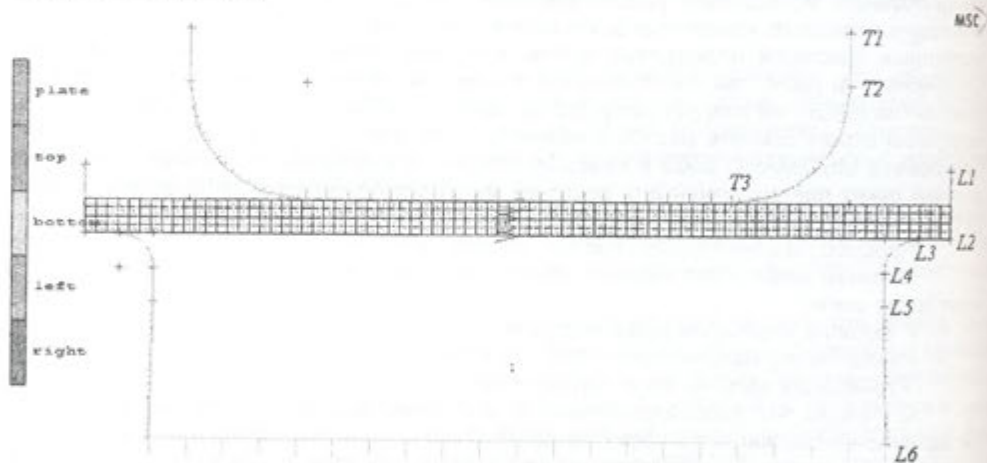


Рис. 2. Задание геометрии штампов при двухугловой гибке.

Для получения требуемой формы заготовки после деформации необходимо двухугловую гибку вести в штампе с прижимом средней части заготовки (Bottom).

Для решения задачи в программе MSC.MARC существенно направление кривых, образующих жесткие тела. Это позволяет программе судить о том, где находится внешняя область, а где находится внутренняя часть тела, ограниченная заданной границей. Дополнительная штриховка около граничных кривых (рис. 2) позволяет визуализировать этот аспект. В процессе подготовки информации о геометрии штампов было необходимо откорректировать направление обхода для отдельных кривых.

Очень существенным моментом моделирования является **задание начальных условий**, в данном случае функций, описывающих движение штампов в условном времени. В частности, было принято, что общее время деформирования составляет 2.5 сек.

При этом рассматривается 50 шагов, т.е. длительность каждого шага деформирования составляет 0.05 сек. Первый этап деформирования длится 1 сек. За это время происходит перемещение пуансона. Исходя из заданной геометрии, ход пуансона может составлять 0.06 м. Тогда движение пуансона может быть описано зависимостью  $0.06 \times F_{top}(t)$ , где  $F_{top}(t)$  - функция, описывающая его движение, представлена на рис. 3.

Аналогично поступаем с матрицей. На первом этапе деформирования она неподвижна, а затем, должна быть отведена на достаточное расстояние. Применяя метод инверсии, процесс изгиба рассматривается при подвижной матрице для того, чтобы не мешать последующему деформированию заготовки. Соответственно движение частей матрицы может быть описано функцией  $-0.01 \times F_{l-r}(t)$  для левой части матрицы и функцией  $0.01 \times F_{l-r}(t)$  для правой. График функции  $F_{l-r}(t)$  показан на рис. 4.

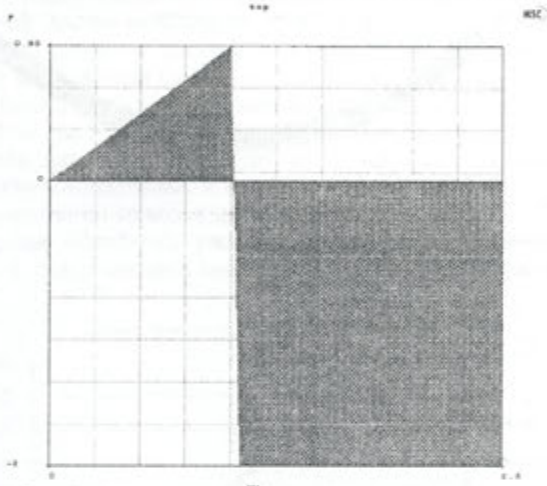


Рис. 3. Функция, описывающая движение пуансона

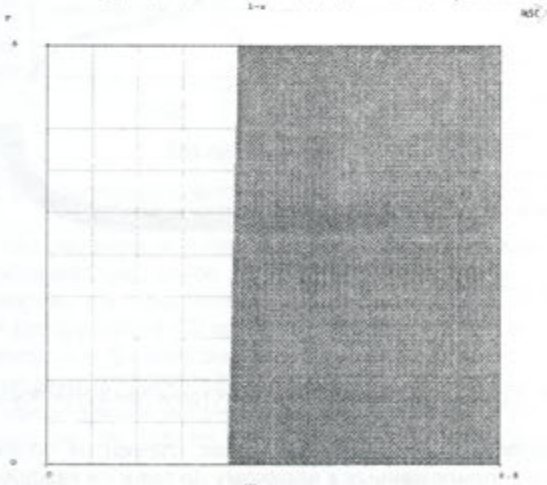


Рис. 4. Функция, при помощи которой описывается движение правой и левой частей матрицы

Отметим еще несколько аспектов, связанных с заданием начальных и граничных условий. Для всех рассматриваемых тел, как деформируемых, так и жестких, был принят коэффициент трения Кулона равный 0.3. Кроме того, в силу симметричности задачи относительно вертикальной оси для узлов, имеющих координату  $x = 0$ , принято граничное условие отсутствия горизонтальных перемещений.

Рассмотрим теперь результаты моделирования деформирования заготовки при двухугловой гибке. Рис. 5 показывает процесс изменения формы заготовки, цветовое заполнение соответствует распределению продольных деформаций.

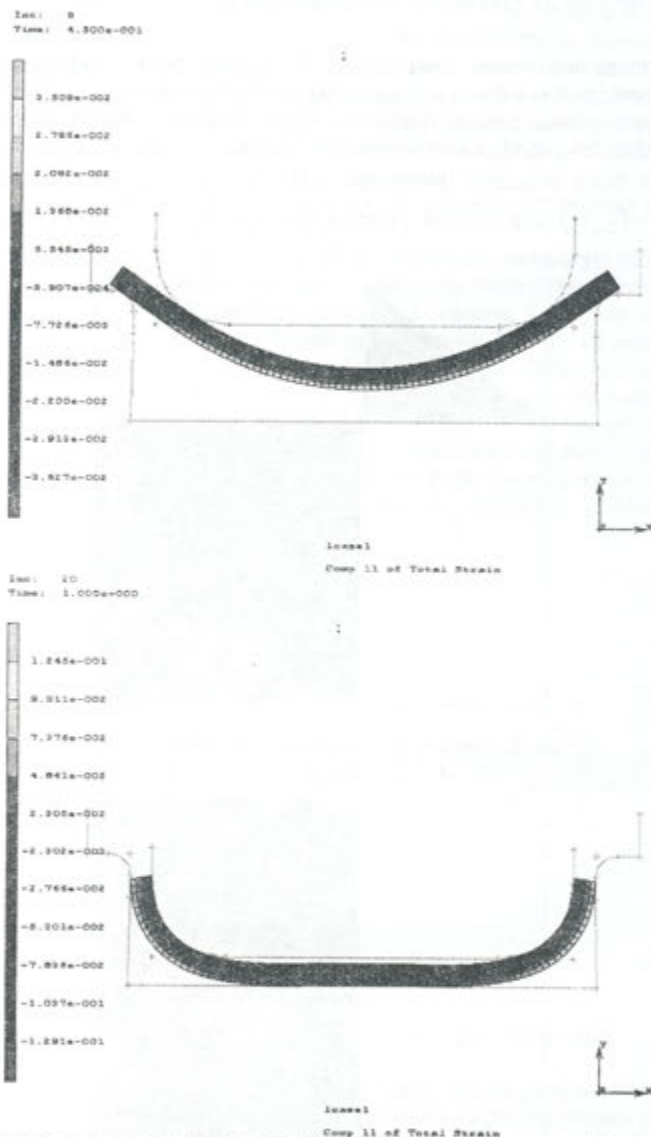


Рис. 5. Процесс деформирования заготовки при двухугловой гибке

В расчете задавались перемещения всех элементов штампа. Для расчета деформирующих усилий, приложенных к верхнему штампу на каждом шаге деформирования, необходимо было написать дополнительные программные модули. Важным преимуществом пакета MSC.MARC является возможность написания дополнительных мо-



дулей, которые могут быть включены в пакет, как его часть. Такой способ позволяет создавать конечные элементы с нестандартными свойствами, задавать нестандартные граничные и начальные условия и т.д.

Стандартная поставка пакета MSC.MARC позволяет определять контактные силы в узлах, которые в результате расчета попали в контактные зоны. Но в силу того, что таких узлов может быть много, то может быть и достаточно большое количество этапов нагружения. В этом случае определить результирующую силу деформации на каждом этапе, а далее проанализировать ее изменение в процессе деформирования представляется затруднительным.

Решение этого вопроса было найдено следующим образом. На алгоритмическом языке Compaq Visual Fortran 6.6C, который воспринимается MSC.MARC был написан модуль UPSTNO.F, в задачу которого входили следующие действия. Во время работы постпроцессора MSC.MARC происходит опрос данных (результатов расчета на каждом шаге вычислений) для каждого узла. Разработанный модуль при этом контролирует признак, является ли данный узел контактным, считывает нормальные и тангенциальные силы для него и определяет вертикальную и горизонтальную проекцию указанных сил, записывая ее в отдельный файл. В результате вычислений определяется файл данных T.DAT, содержащий необходимую информацию.

Тем не менее, далее необходимо этой информацией воспользоваться, выбрав из нее необходимые сведения, поскольку нас интересуют только узлы пуансона, для которых должна быть определена сумма деформирующих усилий. С такой задачей призвана была справиться отдельная программа SUMMA.FOR, которая также написана на Фортране. Результаты, записанные в файле T.DAT для нее являлись исходными. Эта программа считывала данные, для каждого этапа деформирования выбирала узлы пуансона, которые были контактными, и проводила суммирование вертикальных узловых сил. Результаты вычислений записывались в выходной файл RES.DAT.

Окончательная обработка результатов расчета осуществлена в программе MS.EXCEL. На рис. 6. представлена зависимость величины деформирующего усилия от хода пуансона.

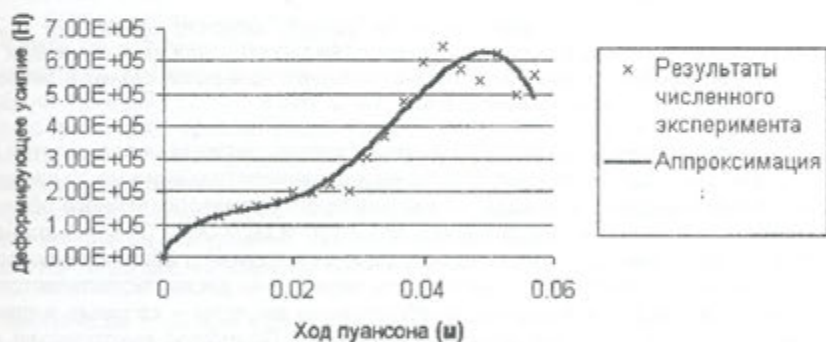


Рис. 6. Зависимость деформирующего усилия от хода пуансона

В силу того, что решение осуществляется численно, на разных шагах решения в контактных зонах оказывается разное количество узлов, в решении для заключительных этапов деформирования присутствует некоторый разброс результатов. Очевидно, что при увеличении дискретности КЭ сетки этот разброс удалось бы уменьшить, однако в этом случае существенно бы возросло время решения задачи, чтобы поставило под сомнение саму возможность такого решения. Поэтому, как для всякого эксперимента, была построена аппроксимация полученных результатов, которая показана на рис. 6 утолщенной сплошной линией. Для ее построения был использован полином 4 степени.

## Выводы

1. Предложенный метод использования программы MSC.MARC 2003 с дополнительными подпрограммами UPSTNO.F и SUMMA.FOR позволяет детально проанализировать такую сложную задачу как двухугловая гибка толстолистовой заготовки.

2. Усилия, действующие на элементы штампов при двухугловой П-образной гибке толстолистовых заготовок, являются экстремальными величинами, зависящими от многих факторов.

2. Данные моделирования позволяют, с достаточной степенью точности, проследить за поэтапным процессом деформирования при двухугловой П-образной гибке; определить упругие деформации, текущие и остаточные напряжения и позволяют управлять процессом пластической деформации.

## Литература

1. Евстратов В.О., Губачева Л.О. Спосіб виготовлення заготовки втулки шплінтона. Д.патент № 3595, G01N19/02, опубл. 15. 12. 2004, бюл. №12.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке.- 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979.-520 с.
3. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. – Харьков: Вища школа, 1981. – 248с.
4. Сладковский А.В., Ситаж М., Мартыненко Ю.Р. Решение задач механики железнодорожного транспорта с помощью МКЭ.Д.: Новая идеология, 2002.-220с.
5. Сладковский А.В. Контактное взаимодействие колес и рельсов.- Луганск: Русь. 2005.-189с.