

На правах рукописи



Бровман Татьяна Васильевна

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Научный консультант:

доктор технических наук, заведующий лабораторией
пластической деформации металлических материалов
ИМЕТ РАН

Юсупов Владимир Сабитович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор кафедры «Обработка
металлов давлением», Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Романцев Борис Алексеевич

доктор технических наук, профессор кафедр «Металлургия» и
«Обработка материалов давлением и аддитивные
технологии», Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский политехнический университет»

Шаталов Роман Львович

доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии
обработки материалов», Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Московский
государственный технический университет имени Н.Э.
Баумана»

Лавриненко Владислав Юрьевич

Ведущая организация: ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

Защита состоится «24» октября 2018 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.060.02, созданного на базе ФГБУН Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский пр., 49., тел. +7 (499) 135-2060

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН, а также на официальном сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru> и на сайте ВАК <http://vak.ed.gov.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенные печатью) просьба отправлять по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский пр., 49, Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: kalash.ds@mail.ru

Автореферат разослан « _____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор технических наук



Калашников И. Е.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В металлургии и машиностроении часто используют процессы пластической деформации, в которых деформацию осуществляют не по всему объему деформируемого тела, а только в малой части его объема. В некоторых важных технологических процессах локальные малые изменения формы деформируемых заготовок могут существенно изменить процесс деформации, например, небольшие изменения оси цилиндрического тела могут при сжатии привести к потере устойчивости и радикальному изменению процесса – вместо одноосного сжатия происходит изгиб и существенное изменение формы деформируемого тела. При этом пластическая деформация может происходить не по всему объему деформируемой заготовки, а только в части этого объема. В этом случае локальная пластическая деформация является отрицательным фактором. Но, такая деформация может быть полезной, если целью процесса деформации является изменение формы деформируемого тела в малой части объема, например, если надо получить трубу с локальным утолщением ее стенки вблизи конца. Вопрос о том, как лучше реализовать такой процесс, важен для создания оборудования, например ковочных машин для осуществления локальной деформации.

Данная работа посвящена анализу процессов, в которых пластическую деформацию реализуют только в части объема деформируемых заготовок, – т.е. процессов локальной деформации. Показано, что в ряде случаев использование локальной деформации даёт расширение технологических возможностей при реализации процесса, позволяет повысить качество изделий.

Уделено внимание усовершенствованию оборудования для реализации процессов локальной пластической деформации.

Цель и задачи исследования Целью данной работы является теоретическое обоснование и разработка технологических основ использования локальной пластической деформации для усовершенствования процессов ОМД, оборудования для их реализации, повышения качественных показателей металлопродукции и расширения ее сортамента. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. На основании исследований разработать современные способы ОМД при локальной пластической деформации с обеспечением устойчивости процессов вытяжки, изгиба и осадки заготовок.
2. Выполнить теоретические исследования процессов локальной деформации полых заготовок, определить энергосиловые параметры.
3. Разработать методику оценки влияния технологических параметров деформации изгиба на точность размеров и кривизну заготовки, определить оптимальный, с точки зрения повышения точности размеров заготовок, интервал усилий.
4. На основании теоретических и экспериментальных исследований определить влияние на точность размеров интенсивности упрочнения деформируемого металла, усовершенствовать технологию изгиба и осадки с целью уменьшить разброс величин относительных изменений кривизны и прогибов.
5. Разработанные теоретические положения реализовать при создании и промышленном освоении нового оборудования.

Научная новизна

1. Теоретически обосновано использование локальной деформации для анализа и совершенствования нестационарных процессов ОМД на примере вытяжки, осадки и изгиба. Предложены уравнения и определены поверхности течения металла, обосновывающие и устанавливающие диапазон технологических режимов получения бездефектных изделий.

2. Разработан новый процесс вытяжки, основанный на создании методом локальной деформации на заготовке искусственных малых волн, амплитудой

1,0-2,0 толщины листа, предотвращающих развитие в процессе деформации волн значительной амплитуды и обеспечивая увеличение в 2,0-2,5 раза длины заготовки без потери устойчивости и образования трещин.

3. На основании теоретического анализа процесса упругопластического изгиба определены соотношения упругих и пластических зон деформируемого металла. Получена функциональная зависимость изменения кривизны от усилия нагружения, установлена величина нагрузки, обеспечивающая заданную точность при изгибе с учетом упрочнения.

4. Найдены решения для статически допустимых полей напряжений и кинематически допустимых полей скоростей при деформации концевых участков трубных заготовок, изгибе в штампах, осадке фланцев, соответствующие различным условиям локальной деформации. Представлены формулы для расчета предельного диаметра фланца трубы, ограниченного потерей устойчивости концевого участка, для заданных размеров трубной заготовки.

5. Разработана новая методика расчета точности геометрических размеров изделия для нестационарных процессов ОМД в условиях локальной деформации, позволившая установить диапазон изменений силовых параметров для обеспечения минимальных отклонений размеров.

Теоретическая и практическая ценность работы

1. На основании теоретического анализа и экспериментальных исследований определены усилия, необходимые для реализации процессов с использованием локальной пластической деформации заготовок.

Проведены экспериментальные исследования с измерением усилий при локальной деформации полых заготовок. Показаны возможности локальной деформации с увеличением наружного диаметра, уменьшением внутреннего диаметра труб, с формированием фланцев в процессе деформации.

2. Спроектированы, изготовлены и находятся в эксплуатации две ковочные машины для производства труб с утолщенными концевыми участками по их длине.

3. На основании экспериментальных исследований процесса локальной деформации концевых участков полых заготовок определены

конструктивные параметры ковочной машины для устойчивой и высокоточной деформации полых заготовок с криволинейными осями в ограниченном объеме.

Новая конструкция (см. патент РФ № 2547977) обеспечивает возможность быстрой и легкой перенастройки машины при переходе к обработке заготовок различных толщин и радиусов кривизны их осей.

4. На основании проведенных исследований процесса вытяжки заготовок с предварительной локальной деформацией их поверхностей и с формированием выступов разработан усовершенствованный технологический процесс производства корпусов фильтров двигателей Д–238, Д–144, КАМАЗ 740.14–300 и коробок корпусов противогозов типа ППФ–95 на предприятии ОАО»2462 ЦБПР» (г. Тверь). Способ использован при изготовлении свыше 20 тысяч изделий с экономическим эффектом двести девяносто семь тысяч рублей.

5. Разработана и используется новая конструкция машины для изгиба заготовок. Новая конструкция позволила повысить точность кривизны заготовок за счет расширения зоны локальной деформации и обеспечения стабильности изгибающего момента, определяющего изменение кривизны профильных конструкций оконных рам.

Методология и методы исследования для решения поставленных в работе задач использованы базовые основы и традиционные методики обработки металлов давлением, современные виртуальные программные продукты статистического анализа данных, методы статистической обработки информации и математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту

- выявленные закономерности процесса нестационарной локальной деформации вытяжки цилиндрических изделий из тонких листов;
- разработка теоретического метода расчета точности размеров изделий, изготавливаемых вытяжкой;

- обоснование нового способа вытяжки, обеспечивающего расширение сортамента изделий и повышение их точности;
- научная проработка и разработка методики расчета точности кривизны, реализуемой в процессах нестационарной деформации изгиба;
- обоснование новой конструкции машины для изгиба заготовок повышенной точности;
- результаты экспериментальных исследований кривизны и прогибов заготовок при различных способах изгиба.

Личный вклад соискателя. При проведении исследований определены идеология и постановка научных задач получения изделий повышенной точности. Лично разработаны методики расчета точности размеров изделий, получаемых в нестационарных процессах ОМД, предложены основные идеи технических и технологических решений нестационарных процессов локальной деформации вытяжки, изгиба, осадки. Выполнен анализ и обобщение лабораторных и промышленных экспериментов, определяющих энергосиловые параметры технологического оборудования. Эксперименты, промышленные испытания и внедрение выполнены под руководством и при личном участии диссертанта.

Степень достоверности и апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены:

- на научных семинарах кафедр «Тверского государственного технического университета, 2005–2018 г.г., лабораторий ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова Российской академии наук;
- на научно-технических советах Тверского предприятия ОАО «2462 ЦБПР»;
- на научно-технических советах ООО НПП «Оснастка».

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались

- на VII международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов. 7–10 ноября 2017 г. Москва, ИМЕТ РАН;
- на VI международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов. 10–13 ноября 2015 г. Москва, ИМЕТ РАН;
- на IV международной конференции «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса» 27–29 ноября 2014 года в г. Новокузнецк;

- на международной конференции «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» 21 – 23 мая 2013 г., г. Орел;
- на международной научной сессии (МНС–12) «Инновационные проекты в области агроинженерии» 9 ноября 2012, Москва, ФГБОУ ВПО МГАУ;
- на IV международной научно-практической конференции «Экология-образование, наука, промышленность». Белгород 2011. 15–18 ноября;
- на международной конференции «Рециклинг отходов. Авторециклинг» 7 апреля 2010г. Санкт-Петербург. Россия;
- на научно-технической конференции «Актуальные проблемы лесного комплекса», Вологда 5-7 декабря 2006 года;
- на международной конференции: «Новые достижения и перспективы развития процессов и машин обработки давлением», Краматорск 22-25 апреля 2003г., Донбасская государственная машиностроительная академия;
- на международном научном семинаре «Проблемы черной металлургии–2014» (в рамках Всероссийской научно-практической конференции «Череповецкие чтения–2014») 11–12 декабря 2014.

Публикации Основные положения диссертации опубликованы в 24 научных работах, в том числе в 12 статьях в журналах, рекомендуемых ВАК для публикаций материалов научных диссертационных работ, в 7 патентах СССР и РФ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, списка литературы (155 наименований). Работа содержит 222 страницы машинописного текста, 14 таблиц, 88 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ показана актуальность и практическое значение процессов обработки металлов давлением с использованием локальной пластической деформации. В этих случаях пластическое течение имеет место только в части объема деформируемой заготовки, а в остальном объеме происходят только упругие деформации. Локальное расположение зон пластической деформации может оказывать отрицательное влияние на точность полученных изделий, но может быть и полезным, обеспечивая возможность получения заготовок с локальными утолщениями. Будут приведены примеры, когда в процесс деформации изделий вводится дополнительная локальная деформация для обеспечения высокого качества

заготовок при реализации основной операции: с пластической деформацией по всему ее объему.

ГЛАВА 1 ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Имеются различия между процессами, в которых пластическая деформация реализуется во всем объеме деформируемого тела и такими, в которых пластическая деформация происходит только в части его объема.

К первым относятся различные видыковки, штамповки, а также основных операций прокатки. Конечно, при прокатке в каждый момент времени подвергается пластической деформации малый объем заготовки, но последовательно реализуется такая деформация по всей ее длине.

В отличие от этих процессов такой вид деформации, как деформация концевых участков труб является примером локальной деформации. Например, если деформацией сжатия на трубе длинами 2...4 м формируют участок увеличенной толщины длиной 0,1...0,2м, то зона пластической деформации составляет 0,025...0,1 общей длины заготовки, т.е. является локальной деформацией.

При локальной деформации концевых участков длинных труб возможна потеря устойчивости и нарушение формы заготовки, ее искривление. Нестабильности процессов пластической деформации способствуют неизбежные изменения условий их реализации: неравномерность нагрева заготовок и колебания коэффициента трения, разброс предела текучести в пределах $\pm(0,10...0,15)\sigma_T$.

Потребность в таких трубах значительна, при строительстве и эксплуатации шахт применяют полые заготовки (трубы) длиной от 1,5 до 6 метров с утолщенными на длине 100–120 мм концами, рис.1.НИИПТМАШ для ОАО «Укруглегеология» разработал комплекс оборудования для обработки труб диаметрами до 62–64мм из углеродистых сталей и сталей типа 36Г2С. Из-за малой толщины стенок, заготовки оказываются переохлажденными, и если их температура снижается менее 1050⁰С, то количество некачественных деталей достигает 5–7%. К процессам локальной деформации, осуществляемой специально для обеспечения переменных характеристик прочности и пластичности, следует отнести накатку поверхности заготовок для наклепа и повышения предела текучести

поверхностного слоя (его упрочнения). Если при деформации концевых участков труб реализация именно локальной деформации является основной целью процесса, то в задачах, связанных с изгибом заготовок, локальный характер пластической деформации является отрицательным фактором.

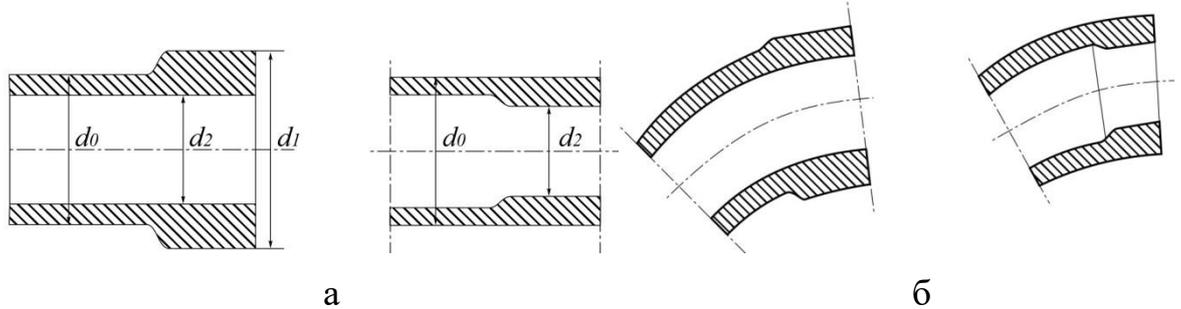


Рис. 1 – Деформация концевых участков заготовок переменного сечения: а – прямолинейных; б – криволинейных

При изгибе заготовки на двух опорах усилием P , рис.2, приложенным в середине ее длины, изгибающий момент $M(x) = 0,5P \cdot x$, где x – координата, равная расстоянию от левой опоры А. Усилия в опорах А и В равны $0,5P$, а напряжения $\sigma = \frac{3Px}{bh^2}$ для заготовки прямоугольного сечения $b \times h$. При $\sigma = \sigma_T$ – начнется зона пластической деформации (σ_T – предел текучести материала заготовки), l_1 определено уравнением:

$$l_1 = \frac{\sigma_T bh^2}{3P}. \quad (1)$$

Но существует предельное значение момента $M_{\max} = 0,25\sigma_T bh^2$ и предельное значение размера l_1 . В сечении $x = 0,5l$ зона пластической деформации охватит все сечение заготовки и максимальная сила равна

$$P_m = \frac{\sigma_T bh^2}{l}, \quad (2)$$

и при этом

$$l_1 = \frac{\sigma_T bh^2 l}{3\sigma_T bh^2} = \frac{l}{3}. \quad (3)$$

При получении заготовок деформацией изгиба ее участки вблизи опор длинами $\frac{l}{3}$ остаются упругими и после разгрузки - прямолинейными.

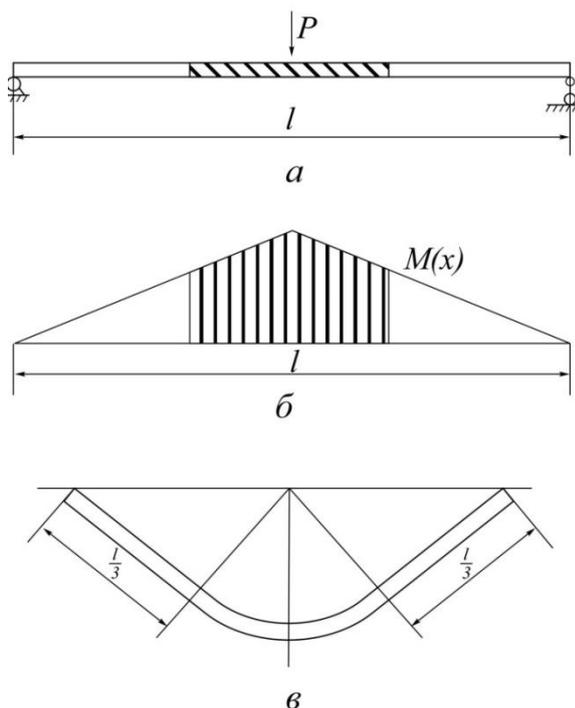


Рис. 2 – Схема изгиба заготовки сосредоточенной силой и эпюра изгибающих моментов: а – схема нагрузки при изгибе; б – эпюра изгибающего момента $M(x)$; в – конфигурация заготовки после деформации

Изгиб прямолинейной заготовки – это процесс, в котором даже при максимальной нагрузке $2/3$ длины заготовки останутся прямолинейными, рис.2 в. Пластическую зону можно создать только на длине, равной $\frac{1}{3}$ длины заготовки. Это создает ряд трудностей при необходимости получить заготовки постоянной кривизны. Если при деформации труб локальный характер деформации был определен целью процесса, то при изгибе локальный характер деформации является отрицательным фактором, возникающим из-за того, что изменить кривизну нельзя в зоне, равной $2/3$ длины заготовки.

На практике широко используют процессы деформации вытяжки цилиндрических заготовок, например, при производстве так называемых «стаканов». По схеме деформации, рис.3а, анизотропные металлы могут образовывать 4,6 и более выступов (фестонов). Их образование изучали Р.Хилл, Л.А. Шофман, и другие ученые.

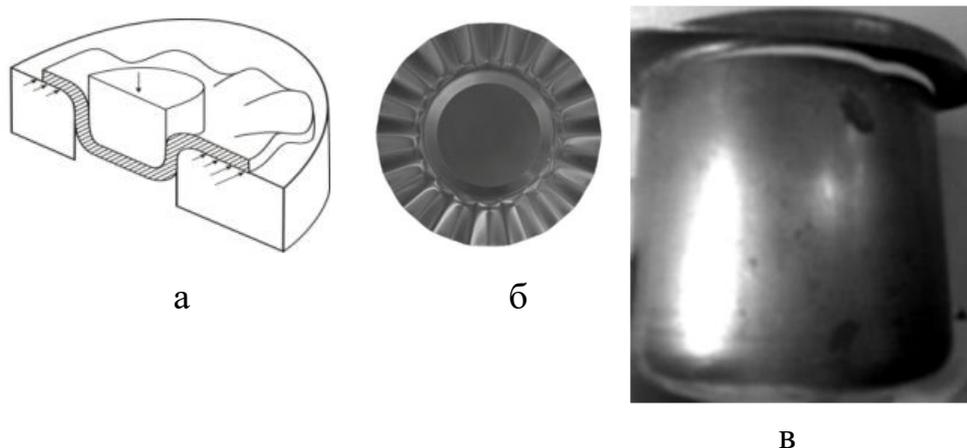


Рис.3– Схемы: а–деформации вытяжки; б – образование складок; в – фотографии деформируемого изделия диаметром 110 мм, высотой 92 мм из стали 08Ю с кольцевой трещиной

Из-за потери устойчивости при деформации вытяжки заготовок типа «стаканов» их длина ограничена. Ниже будет показано, что применением локальной дополнительной деформации можно повысить устойчивость деформируемых заготовок и их качество.

ГЛАВА 2 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ПРОЦЕССАХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

При исследовании напряженного состояния в процессах упруго-пластической деформации в большинстве случаев необходимо найти компоненты тензора напряжений σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) и вектора скорости V_i ($i = 1, 2, 3$). В данной работе используются в основном цилиндрические координаты, запишем уравнения равновесия в цилиндрических координатах r, θ, z , где $r = 0$, θ – полярный угол, z – ось симметричной заготовки.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

При осевой симметрии и $\tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = 0$ система (4) будет содержать только два уравнения:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0. \quad (5)$$

Уравнения равновесия (4) выполняются и при упругой и при пластической деформации. Для определения шести неизвестных функций $(\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{r\theta}, \tau_{\theta z}, \tau_{rz})$ уравнений (4) и (5) недостаточно. Для связи напряжений и деформаций в теории упругости используют закон Гука, а при пластических деформациях развиты два основных направления теоретических способов расчета. В деформационной теории, разработанной в трудах А.А.Ильюшина, Г.Генки, используют функциональные зависимости, определяющие связь пластических составляющих тензора деформации:

$$\varepsilon_{ij}^n = \varphi \sigma'_{ij}, \quad (6)$$

где ε_{ij}^n – часть тензора ε_{ij} , равная пластической составляющей этого тензора. В формуле (6) σ'_{ij} – составляющие девиатора деформации, равные $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_c$, где $\sigma_c = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}$ – среднее напряжение, а функцию φ принимают зависящей только от второго инварианта тензора напряжений T_2 . Методы решения таких задач приведены в работах А.А.Ильюшина, В.В.Соколовского и других ученых.

Вторая группа теорий пластичности основана на идее, предложенной Б.Сен-Венаном, о том, что компоненты девиатора напряжений определены не компонентами тензора деформаций ε_{ij}^n , а компонентами малых приращений этого тензора $d\varepsilon_{ij}^n$. На основе этой идеи были получены уравнения Леви-Мизеса $d\varepsilon_{ij}^n = \sigma'_{ij} df$, где f – универсальная для данного материала функция, которую принимают зависящей только от второго инварианта тензора σ'_{ij} . Поскольку приращение $d\varepsilon_{ij}^n$, деленное на малый интервал времени, равно соответствующей компоненте тензора скорости деформации, $\frac{d\varepsilon_{ij}^n}{dt} = \dot{\varepsilon}_{ij}$, то определены соотношения между компонентами тензора напряжений и производных тензора скорости деформации по времени.

Часто используют метод построения кинематически допустимых полей скоростей, который удовлетворяет краевым условиям для скоростей и на некоторых поверхностях v_r, v_z удовлетворяют соотношениям

$$f_{\Sigma}(v_r, v_z) = 0. \quad (7)$$

Эти поверхности могут ограничивать или профиль инструмента (штампа, валка, пуансона), или границу жесткой зоны.

Мощность, определяемая кинематически допустимым полем N_k , не может быть меньше, чем мощность, определяемая точным решением данной задачи, т.е.

$$N_k \geq N. \quad (8)$$

Если удастся построить статически допустимое поле напряжений σ_{ij} , то такое поле должно не нарушать неравенства текучести

$$T_2 = (\sigma_r - \sigma_{\theta})^2 + (\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6 \tau_{rz}^2 \leq 6 k^2. \quad (9)$$

Если построены и статически допустимое поле напряжений и кинематически допустимое поле скоростей течения, то получаем двухстороннюю оценку величины мощности N :

$$N_c \leq N \leq N_k. \quad (10)$$

При пластической деформации нижняя граница определена условием $\sigma_n \geq \sigma_T$ (или $\sigma_n \geq 2k$), где σ_n – нормальное напряжение, которое не может быть меньше, чем σ_T . Следуя В.Л.Колмогорову, можно сформулировать задачу, как определение экстремума функционала

$$J = \iiint \sigma_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \cdot dV + \iint_S \tau_n \Delta V_i dS, \quad (11)$$

здесь V_i – скорости течения на контактных поверхностях, где действует напряжение τ_n (величина S – соответствует сумме всех этих поверхностей). Для идеально-пластических тел, (при $\sigma_T = \text{const.}$, возможно существование поверхностей разрыва тангенциальной компоненты скорости V_t , на которых $\tau_n = k$) и вместо (11) можно записать

$$J = \iiint \sigma_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \cdot dV + \iint_S \tau_n \Delta V_i dS + \int_{S_1} k V_t dS_1. \quad (12)$$

При этом учитывается мощность деформации среза и деформации сил трения, а нормальные компоненты этого вектора на любых поверхностях должны быть непрерывными. Иногда вместо условия текучести Губера-Мизеса используют условие Треска–Сен-Венана, которое в главных напряжениях $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ можно записать в виде

$$|\sigma_1 - \sigma_3| = 2k. \quad (13)$$

Это условие удобно применять в тех случаях, когда известны направления главных напряжений.

Глава 3 УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК И ПОВЫШЕНИЕ ИХ ТОЧНОСТИ.

Представлена методика определения напряжений и перемещений при вытяжке, рис.3а,4. Ввиду малой толщины листовой заготовки примем допущения $\tau_{rz} = 0, \sigma_z = 0$ и получим систему уравнений при условии текучести Мизеса.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0; \\ \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r \sigma_\theta &= 3k^2. \end{aligned} \quad (14)$$

Если же использовать условие текучести Треска, приняв σ_r и σ_θ за главные напряжения, то получим

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2k. \quad (15)$$

Если использовать условия Треска, то с учетом $\sigma_r = 2k \ln \frac{R_0}{r}$ получим

$$\sigma_\theta = 2k \left(\ln \frac{R_0}{r} - 1 \right). \quad (16)$$

На наружном контуре заготовки компонента тензора напряжений $\sigma_r = 0$, а $\sigma_\theta = -2k$ (т.е. σ_θ – напряжение сжатия). По модулю величина σ_θ максимальна на наружном контуре заготовки при $r = R_0$. Далее напряжение σ_r возрастает с уменьшением « r » до максимума, равного $\sigma_r = 2k \ln \frac{R_0}{R_1}$, где R_1 – внутренний радиус стакана, (эта часть работы выполнена совместно с М.Г. Васильевым). Если $\ln \frac{R_0}{R_1} = 1$, при $\frac{R_0}{R_1} = e = 2,72$, то $\sigma_r = 2k$ – это максимальное напряжение и оно определяет предельную величину вытяжки, ее превышение может привести к появлению кольцевой трещины, рис. 1в. Компонента тензора σ_θ отрицательна и убывает (по модулю) от $\sigma_\theta = -2k$ при $r = R_0$ до $\sigma_\theta = -2k(1 - \ln \frac{R_0}{R_1})$. Если использовать условие Мизеса, то компонента напряжения равна $\sigma_\theta = 0,5 \left[\sigma_r \pm \sqrt{3(4k^2 - \sigma_r^2)} \right]$ и уравнение равновесия примет вид $\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{0,5}{r} \left(\sigma_r + \sqrt{3} \sqrt{4k^2 - \sigma_r^2} \right) = 0$. При краевом условии $\sigma_r = 0$, при $r = R_0$ получили функциональную связь компоненты тензора напряжения σ_r и координаты r в виде

$$\ln \frac{R_0}{r} = \frac{\sqrt{3}}{2} \arcsin \left(\frac{\sigma_r}{2k} \right) + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\sigma_r + \sqrt{3} \sqrt{4k^2 - \sigma_r^2}}{2k\sqrt{3}} \right|. \quad (17)$$

Из (17) следует, что при $r = R_0$, $\sigma_r = 0$, предельная степень вытяжки определена соотношением $\frac{R_0}{R_1} = 2,48$, (а не 2,72), как при условии текучести Треска.

Разработан алгоритм компьютерного моделирования технологического процесса вытяжки тонколистовых осесимметричных заготовок с помощью программного комплекса DEFORM 3D, который позволил прогнозировать потерю устойчивости заготовки и образование на ней волн большой амплитуды. При моделировании вытяжки удалось качественно и количественно оценить напряженно-деформируемое состояние кольцевой части фланцевой части заготовки. Полученные результаты на 10-15% отличались от результатов реальных экспериментов.

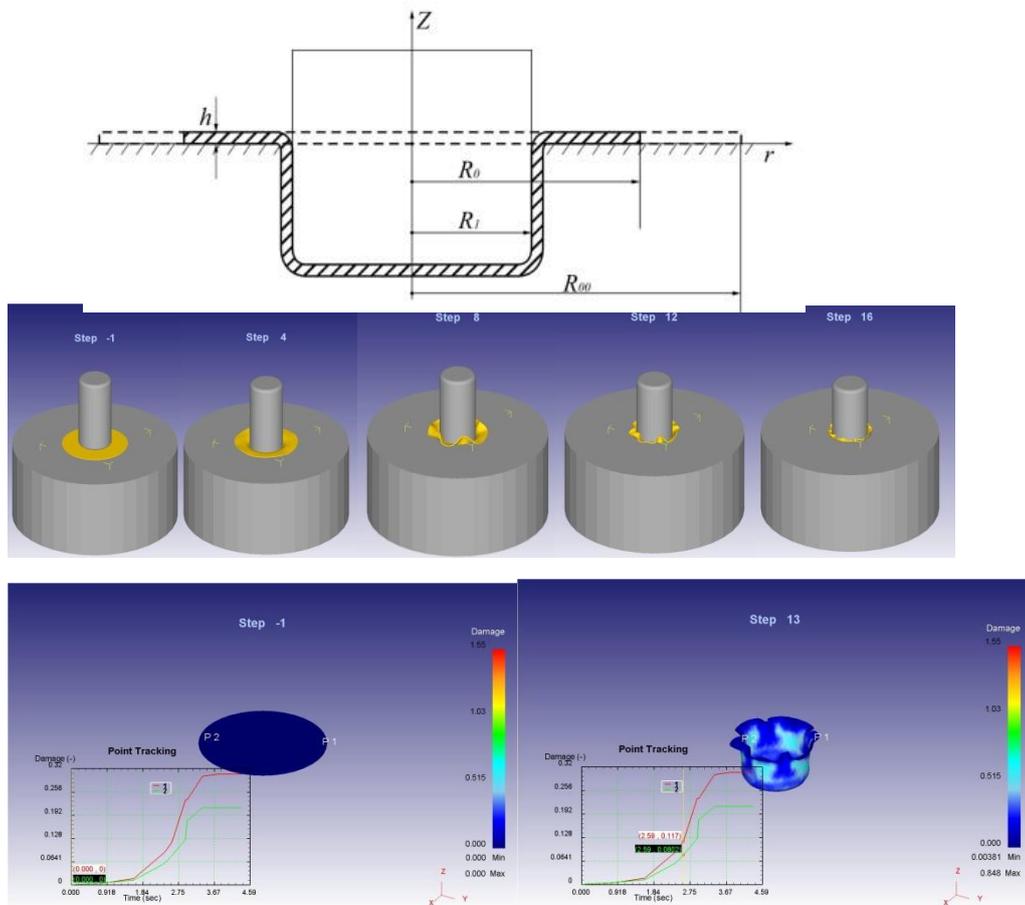


Рис.4 – Схема деформации при вытяжке стакана и результаты пошагового компьютерного моделирования DEFORM 3D

На рис. 5 приведены графики изменения напряжений при высадке цилиндрических стаканов.

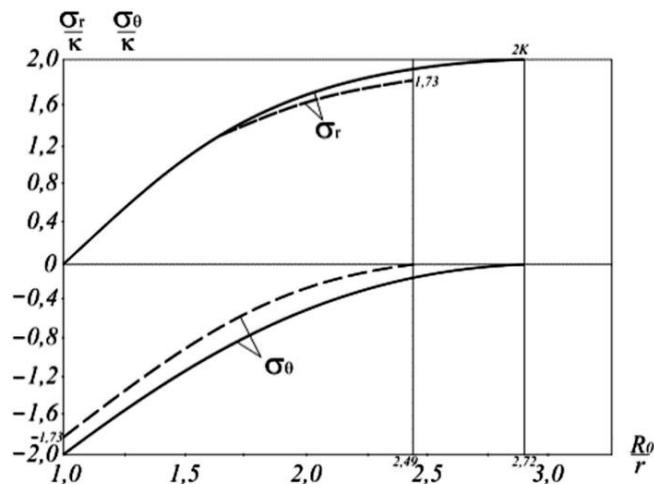


Рис.5 – Графики функций, характеризующих изменение напряжений $\frac{\sigma_r}{k} \left(\frac{R_0}{r} \right)$ и $\frac{\sigma_\theta}{k} \left(\frac{R_0}{r} \right)$: сплошные линии – с применением условия текучести Треска-Сен-Венана, пунктирные – с применением условия Мизеса

Рассмотрим возможную структуру формул для определения усилия вытяжки P . Приведем все переменные с указанием их размерностей: усилие P (МН), предел текучести материала $\sigma_T \left(\frac{\text{МН}}{\text{м}^2} \right)$; наружный радиус заготовки R_0 (м); радиус пуансона (приблизленно – внутренний радиус стакана): R_1 (м); толщина деформируемого листа h (м). Из этих величин можно составить ряд безразмерных параметров: $A_1 = \frac{P}{\sigma_T R_1 h}$; $A_2 = \frac{R_0}{R_1}$; $A_3 = \frac{R_1}{h}$. Согласно π теореме, всякое соотношение между характеристиками процесса, имеющего физический смысл, должно иметь вид соотношения между безразмерными параметрами, (составленными из величин, имеющих размерность), т.е. в данном случае все параметры связаны функцией $f(A_1, A_2, A_3) = 0$. Введя в параметр A_1 множитель 2π , ($A_1 = \frac{P}{2\pi R_1 \sigma_T h}$), получаем вид формулы:

$$P = 2\pi R_1 h \sigma_T f \left(\frac{R_0}{R_1}, \frac{R_1}{h} \right) \quad (18),$$

где $f\left(\frac{R_0}{R_1}, \frac{R_1}{h}\right)$ – функция указанных параметров. При $f\left(\frac{R_0}{R_1}, \frac{R_1}{h}\right) = 1,0$ реализуется срез по цилиндрической поверхности радиусом R_1 и значения функции $f > 1$ недопустимы, поэтому при любых формулах в случае превышения величиной f данного предела следует принимать $f = 1,0$. Для анализа функции $f\left(\frac{R_0}{R_1}, \frac{R_1}{h}\right)$ используем метод построения кинематически допустимого поля скоростей, рис.6.

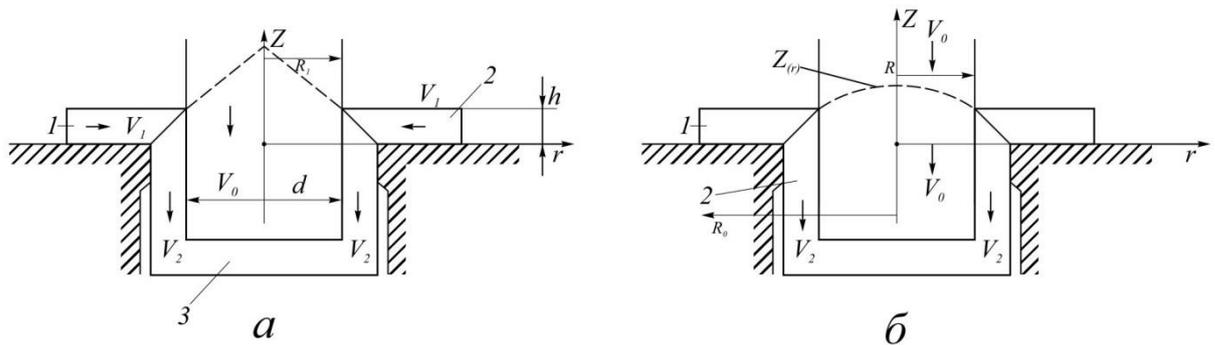


Рис.6 – Кинематически допустимые поля скоростей: а – при плоской; б – при осесимметричной деформации

При плоской деформации имеются 3 жесткие зоны, две из которых: 1 и 2 движутся в противоположных направлениях вдоль оси r с постоянной скоростью $v_r = const. = \pm v_1$, зона 3 движется вдоль оси z . При осесимметричной деформации такое, кинематически возможное поле скоростей существует только в том случае, если существует поверхность вращения $Z(r)$, на которой возможно обеспечить условие непрерывности нормальной компоненты скорости v_n , а тангенциальная ее компонента для идеальной жестко-пластической среды может иметь разрыв.

Согласно расчетам такая поверхность существует и ее уравнение

$$Z(r) = \frac{(R_1+h)^2 - r^2}{2R_1+h}. \quad (19)$$

В кольцевой зоне примем компоненты скорости

$$v_r = -v_0 \frac{R_1}{r}; v_z = 0, \quad (20)$$

а при $Z < Z(r)$: $v_r = 0$; $v_z = -v_0$. В первой из этих зон компоненты тензора скорости деформации $\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta = -v_0 \frac{R_1}{r^2}$; $\varepsilon_z = 0$; $H = \frac{2v_0 R_1}{r^2}$; а во второй $v_r = 0$; $v_z = -v_0$; $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = H = 0$, где H – второй инвариант тензора скоростей деформации.

$$\text{Мощность формоизменения } N_1 = \int_{R_1}^{R_0} 2\pi r k h H dr = 4\pi k v_0 R_1 h \ln \frac{R_0}{R_1},$$

а мощность среза на границе параболоида $Z(r)$ равна:

$$N_2 = \int_{R_1}^{R_1+h} 2\pi r k \Delta v \sqrt{1 + (\dot{Z})^2} dr = 2\pi k v_0 R_1 h \left(1 + \frac{h}{2R_1}\right).$$

Здесь $\Delta v = v_0 [1 + \dot{Z}^2(r)]^{0,5} [\dot{Z}(r)]^{-1}$ – разрыв тангенциальной компоненты скорости на поверхности $Z(r)$. В результате расчетов получаем:

$$P = \frac{2\pi \sigma_T h}{\sqrt{3}(1-\mu)} (1 + 2\ln A_2). \quad (21)$$

Согласно этим данным функция f не зависит от параметра A_3 , но необходимо проверить условие $f(A_2) = 1 + 2\ln A_2 \leq 1,0$.

Например, при $R_0 = 0,18$ м, $R_1 = 0,10$ м, $h = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $\sigma_T = 450 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$;

$A_2 = 1,8$; $f(A_2) = 2,17$; следует принять $f(A_2) = 1,0$ (при $\mu = 0,1$) усилие

$$\text{равно } P = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 450 \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot 0,9} = 0,363 \text{ МН}$$

Изложенные расчеты показывают возможность возникновения двух видов дефектов при вытяжке: возникновению кольцевых трещин при воздействии напряжений растяжения σ_r и потеря устойчивости при действии напряжений сжатия σ_θ . Для многих сталей предельное соотношение радиусов равно $\frac{R_0}{R_1} = 2,5$. Вторым отрицательный фактор – потеря устойчивости может происходить при воздействии критического напряжения сжатия σ_k :

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 k_1 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{R_0 - R_1}\right)^2, \quad (22)$$

где E – модуль упругости, γ – коэффициент Пуассона, k_1 – коэффициент, равный 1,49 ...2,52. Если приравнять $\sigma_k = \sigma_T$, то получим критическую величину $\left(\frac{h}{R_0-R_1}\right)_k^2 = \frac{12\sigma_T(1-\gamma^2)}{\pi^2 k_1 E}$, что определяет предельное отношение

$$A = \sqrt{\frac{\pi^2 k_1 E}{12(1-\gamma^2)}}; \text{ и при } k_1=2; \gamma=0,3; A = \left(\frac{R_0-R_1}{h}\right)_k = 1,34 \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}}. \quad (23)$$

Например, для стали при $E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}; \sigma_T = 300 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}; A = 34,6$; а согласно формулам Шофмана Л.А. $A=38...40$, но данные, имеющиеся в литературе, часто противоречивы и встречаются значения A от 20 до 55.

Предельные длины изделий («стаканов»), которые можно получить вытяжкой, равны $L = (1,34 \dots 1,70) \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}}$. (24)

В реальных условиях параметры, от которых зависит критерии устойчивости, могут изменяться: $R_1 \pm \Delta R_1, R_{00} \pm \Delta R_{00}, h \pm \Delta h$. Если рассматривать функцию $A_m(R_{00}, R_1, h)$ как функцию трех аргументов, то ее изменение равно $\Delta A_m = \frac{\partial A_m}{\partial R_{00}} \Delta R_{00} + \frac{\partial A_m}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial A_m}{\partial h} \Delta h$, а относительное изменение $\frac{\Delta A_m}{A_m} = \frac{R_{00}}{R_{00}-R_1} \left(\frac{\Delta R_{00}}{R_{00}}\right) - \frac{R_1}{R_{00}-R_1} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right) - \frac{\Delta h}{h}$. В наихудшем случае, при $\Delta R_{00} > 0, \Delta R_1 < 0$ и $\Delta h < 0$ влияние отклонений суммируется, если, $R_{00} = 0,10 \text{ м}, R_1 = 0,05 \text{ м}, h = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, то $A_m = \frac{0,10-0,05}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 33,3$. Если отклонения таковы, что $\Delta R_{00} = 0,01 \text{ мм}, \Delta R_1 = -0,01 \text{ мм}, \Delta h = -0,001 \text{ мм}$ т.е. $\frac{\Delta R_{00}}{R_{00}} = 0,1; \frac{\Delta R_1}{R_1} = -0,2; \frac{\Delta h}{h} = -0,67$, то $\frac{\Delta A_m}{A_m} = 0,97$; а $\Delta A_m = 32,3$, возможны колебания параметра A_m до 65,6. Наибольшее влияние на колебания функции A_m оказывает разнотолщинность листового проката. При больших отклонениях Δh , надо использовать не дифференциальную, а более точную зависимость $\Delta A_m = (R_{00}-R_1) \left(\frac{1}{h+\Delta h} - \frac{1}{h}\right)$.

При $R_{00}-R_1 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}, h = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \Delta h = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \Delta A_m = 10$.

Экспериментальные исследования процессов вытяжки цилиндрических изделий из стали 08кп и стали 45 радиусами $R_{00} = 100$ мм; $R_1 = 50$ мм, 60 мм, 70 мм и $h = 0,5$ мм; 1 мм; 1,25 мм выявили нарушения устойчивости начиная с величины $A = 32-34$ в 10% замеров. При $A = 35-38$ оно возросло до 12-14%, а при $A=40-44$ превысило 50%. Число волновых выступов было в 20% всех случаев равным 4 – 6, а в 25-30% опытов 10 –12. Опыты с использованием 50 образцов при $R_{00} = 100$ мм, $R_1 = 60$ мм и $h = 0,5$ мм при значении параметра $A = \frac{100-60}{0,5} = 80$ показали, что возникает потеря устойчивости и волнистость. На основании исследований разработан новый способ вытяжки, с созданием в дисковой заготовке искусственной анизотропии, уменьшив ее жесткость в тангенциальном направлении, (но, не изменив ее жесткость в радиальном направлении). На листовой заготовке вдоль кольцевого пояса, рис.7а формируют до 16 – 28 «волн» (выступов) амплитудой $(1 \dots 2)h$. Новый способ позволяет в 2,0 – 2,5 раза увеличить длину изделий, изготавливаемых за одну операцию. Способ использован в кузнечно-прессовом цехе предприятия ОАО «2462ЦБПР». Измерения усилий с помощью тензодатчиков на пуансоне показали величины усилий 240 – 300 кН. Использовали листы стали 08Ю, рис.8, количество некачественных деталей не превышало 0,8%.

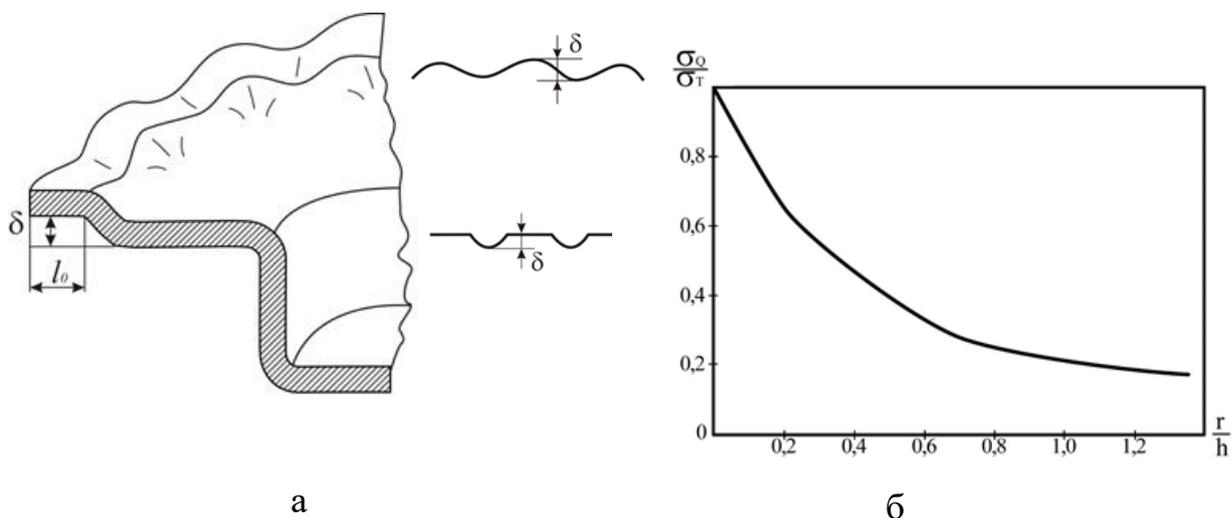


Рис.7– Формирование волн вдоль кольцевого пояса: а – схема нового процесса вытяжки; б – график зависимости показателя искусственной пластической анизотропии, создаваемой углублением в листе



Рис.8 – Образцы изделий, изготовленных с использованием нового способа

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВИЗНЫ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБА. Основной задачей процессов изгиба является не достижение заданного прогиба, а получение необходимой кривизны заготовок. В трубе или в цилиндрическом сосуде радиусом R с толщиной оболочки h давление газа (или жидкости) p приводит к появлению тангенциальных напряжений равных $\sigma = \frac{p}{Kh}$, где K – величина кривизны. Колебания напряжений $\Delta\sigma = -\sigma \frac{\Delta K}{K}$ и колебания кривизны $\frac{\Delta K}{K} = \pm 0,1$ вынуждают предусматривать «запасы прочности» и уделять особое внимание повышению точности кривизны заготовок.

При изгибе заготовки усилием P , приложенным в середине ее длины в зоне пластической деформации кривизна составит $K = \frac{d^2V}{dx^2} = \frac{2a}{l\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{1-8m\frac{x}{l}}}$.

При $m \leq \frac{1}{6}$ по всей длине реализуется только упругая деформация, а значение $m = \frac{1}{4}$ является для упругопластической среды без упрочнения предельным, остаточная кривизна при $x = 0,5l$ будет максимальной:

$$K_0 = \frac{a}{l} \left[\frac{2}{\sqrt{3}\sqrt{1-4m}} - 12m \right]. \quad (25)$$

Если задана функция переменных x_1, x_2, \dots, x_n ; $f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ и эти переменные испытывают изменения на $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n$, то возможное отклонение функции: $\Delta f = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$. Максимальная величина кривизны:

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = \frac{\Delta a}{a} \frac{\Delta l}{l} + \frac{2\Delta m}{(1-4m)} = C_i \frac{\Delta x_i}{x_i} = C_1 \frac{\Delta a}{a} + C_2 \frac{\Delta l}{l} + C_3 \frac{\Delta m}{m}. \quad (26)$$

Максимальная погрешность K_m равна сумме относительных погрешностей аргументов $C_1 = 1, C_2 = -1, C_3 = \frac{4-12\sqrt{3}(1-4m)^{1,5}}{(2-12m\sqrt{3}\sqrt{1-4m})(1-4m)}$.

Отклонения параметров «а» и «l» суммируются $\frac{\Delta a}{a} = 0,08; \frac{\Delta l}{l} = -0,06$; наибольшее отклонение $\frac{\Delta K_m}{K_m} = 0,14$, рис.9. Возможная погрешность резко возрастает с приближением параметра «m» к предельной величине $m = 0,25$ (исследования упругопластического изгиба выполнены совместно с аспирантом А.А. Кутузовым). Возможная величина отклонения ΔK_0 равна:

$$\Delta K_0 = \frac{\Delta a}{l} \left(\frac{2}{\sqrt{3}\sqrt{1-4m}} - 12m \right) - \frac{\Delta l}{l^2} \left(\frac{2}{\sqrt{3}\sqrt{1-4m}} - 12m \right) + \frac{a}{l} \left[\frac{2}{\sqrt{3}(1-4m)^{1,5}} - 12m \right].$$

Функция $C_3(m)$ имеет минимум при $m = 0,225$, небольшое отклонение параметра нагрузки $\frac{\Delta m}{m}$ порядка 0,01–0,02 может вызвать погрешность в величинах остаточной кривизны в 50–100 раз выше.

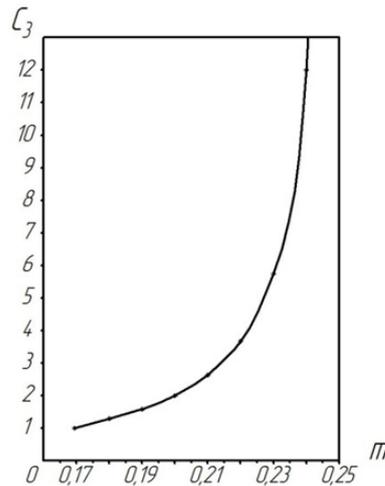


Рис.9 – График функций $C_3(m)$ для кривизны K_0

Безразмерный параметр, характеризующий нагрузку $m = \frac{Pl}{4\sigma_T b h^2}$ имеет

относительное отклонение: $\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta \sigma_T}{\sigma_T} - \frac{\Delta b}{b} - \frac{2}{h} \Delta h$.

Если $\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta l}{l} = 0,05; \frac{\Delta \sigma_T}{\sigma_T} = -0,05; \frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta h}{h} = 0,01$, то верхняя оценка

относительного отклонения параметра "m" равна $\frac{\Delta m}{m} = 0,17$. Приняв

значения $\frac{\Delta a}{a} = 0,14$ и $\frac{\Delta m}{m} = 0,17$, а $\frac{\Delta l}{l} = 0,05$, относительное отклонение максимальной величины кривизны K_m при $m = 0,2$: $\frac{\Delta K_m}{K_m} = 0,53$, коэффициент $C_3 = 76,43$, а относительное изменение кривизны значительно: $\frac{\Delta K_0}{K_0} = 13,2$. Эта величина на порядок выше, чем относительные изменения

максимальной кривизны, т.е. $\frac{\Delta K_0}{K_0} \gg \frac{\Delta K_m}{K_m}$. По схеме изгиба заготовки двумя равными силами, рис.10, изгибающий момент и кривизна являются постоянными на длине $l - 2l_0$ при $l_0 < x < l - l_0$; $K_m = \frac{2a}{l\sqrt{3}\sqrt{1-8m\frac{l_0}{l}}}$, а

относительное изменение этой величины $\frac{\partial K_m}{\partial l} = -\frac{K_m}{l} \frac{1-4m\frac{l_0}{l}}{1-8m\frac{l_0}{l}}$; $\frac{\partial K_m}{\partial m} = \frac{4K_m \frac{l_0}{l}}{(1-8m\frac{l_0}{l})}$; ИЛИ

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = C_1 \frac{\Delta a}{a} + C_2 \frac{\Delta l}{l} + C_3 \frac{\Delta m}{m} + C_4 \frac{\Delta l}{l}. C_1=1; C_2=-1; C_3=C_4=\frac{4l_0}{l(1-8m\frac{l_0}{l})}.$$

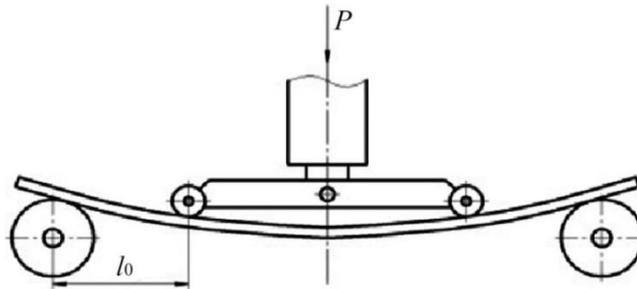


Рис. 10 – Установка для проведения опытов с нагружением двумя равными силами

При $m = 0,22$; $C_3 = 0,82$; $C_4 = 0,18$; $\frac{\Delta K_m}{K_m} = \frac{\Delta a}{a} - \frac{\Delta l}{l} + 0,82 \frac{\Delta m}{m} + 0,18 \frac{\Delta l}{l}$. При $\frac{\Delta a}{a} = 0,10$; $\frac{\Delta l}{l} = -0,03$; $\frac{\Delta m}{m} = 0,5$; $\frac{\Delta l}{l} = 0,03$; $\frac{\Delta K_m}{K_m} = 0,545$, возможны колебания кривизны заготовки в диапазоне $(0,5 \div 1,5) \text{ м}^{-1}$. Остаточная кривизна на участке постоянной кривизны равна:

$$K_0 = \frac{a}{l} \left[\frac{2}{\sqrt{3}\sqrt{1-8m\frac{l_0}{l}}} - 24m \frac{l_0}{l} \right]; \frac{\partial K_0}{\partial l} = \frac{8am}{l^2} \left[\frac{1}{\sqrt{3}(1-8m\frac{l_0}{l})^{1,5}} - 3 \right]. \quad (27)$$

Относительное изменение остаточной кривизны равно

$\frac{\Delta K_0}{K_0} = C_1 \frac{\Delta a}{a} + C_2 \frac{\Delta l}{l} + C_3 \frac{\Delta m}{m} + C_4 \frac{\Delta l_0}{l_0}$, где коэффициенты C_i : $C_1 = 1$;

$$C_2 = \frac{4m \frac{l_0}{l} - 1 + 12\sqrt{3} m \frac{l_0}{l} (1 - 8m \frac{l_0}{l})^{1,5}}{(1 - 8m \frac{l_0}{l})(1 - 12\sqrt{3} m \frac{l_0}{l} \sqrt{1 - 8m \frac{l_0}{l}})}; C_3 = C_4 = \frac{4m \frac{l_0}{l} [1 - 3\sqrt{3}(1 - 8m \frac{l_0}{l})^{1,5}]}{(1 - 8m \frac{l_0}{l})(1 - 12\sqrt{3} m \frac{l_0}{l} \sqrt{1 - 8m \frac{l_0}{l}})}$$

Если $\frac{l_0}{l} = 0,10; m = 1,2$; то $K_0 = 0,78 \frac{a}{l}$; $C_1 = 1$; $C_2 = -1,15$; $C_3 = C_4 = -0,46$,

при этих условиях $\frac{\Delta K_0}{K_0} = \frac{\Delta a}{a} - 1,15 \frac{\Delta l}{l} - 0,46 \frac{\Delta m}{m} - 0,46 \frac{\Delta l_0}{l_0}$. В наихудшем

случае, если $\frac{\Delta a}{a} = 0,10; \frac{\Delta l}{l} = -0,03; \frac{\Delta m}{m} = 0,15; \frac{\Delta l_0}{l_0} = -0,03$; $\frac{\Delta K_0}{K_0} = 0,22$.

Предельная величина для упругой деформации равна $m_{min} = \frac{l}{12l_0}, K_0 = 0$, а

$\frac{\Delta K_0}{K_0} \rightarrow \infty$. Величины C_2, C_3, C_4 по модулю возрастают при $\frac{l_0}{l} > 0,15$,

возрастание усиливается с увеличением нагрузки и величины кривизны,

рис.11. Чем выше степень деформации при изгибе, тем выше погрешности и

тем ниже точность размеров заготовок. При $\frac{l_0}{l} = 0,5$ – т.е. при изгибе одной

силой, приложенной в середине длины заготовки, точность ее размеров резко

снижается. Экспериментальные исследования зависимости прогиба от

усилий проводили на прессах усилиями 0,25 МН и 0,50 МН листов из

углеродистой стали при $\sigma_T = 260 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$; $b = 0,5$ м, $h = 4 \cdot 10^{-2}$ м при $l = 1$ м.

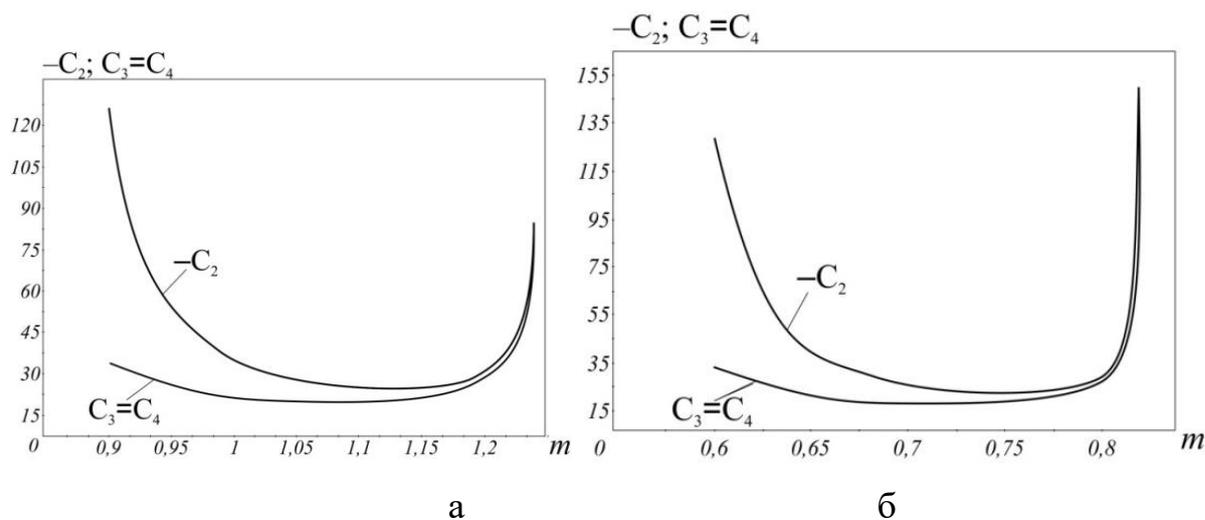


Рис. 11 – Графики функций для схемы изгиба заготовки двумя равными силами – $C_2(m); C_3(m) = C_4(m)$: а – $\frac{l_0}{l} = 0,15$; б – $\frac{l_0}{l} = 0,20$

Были определены средние величины прогибов, их среднеквадратичные отклонения и параметр $S = \sqrt{\frac{\sum(v-v_m)^2}{n \cdot (n-1)}}$. При $P = 140$ кН; $S = 0,086$, числе опытов $n = 6$ и доверительной вероятности $\alpha = 0,999$; функция $t_\alpha = 6,86$ отклонение $\varepsilon = t_\alpha \cdot S = 0,59$; интервал разброса: $v = (5,1 \pm 0,59) \cdot 10^{-3}$ м.

Можно сделать вывод о достоверности статистического анализа, поскольку доверительные интервалы по обычной методике (по правилу «трех сигм») и по теории Стьюдента (с вероятностью 0,999) близки и изменяются в интервале $(0,6 \div 1,2) \cdot 10^{-3}$, т.е. погрешность достигает 12%, рис.12.

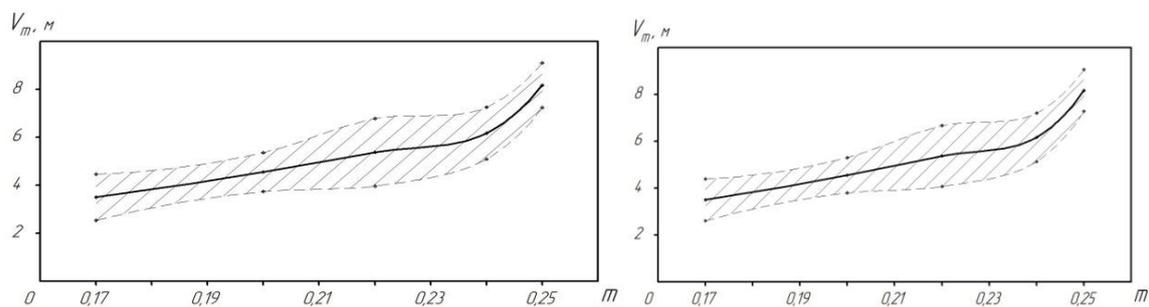


Рис. 12 – Зависимость прогиба V_m от параметра нагрузки m , при изгибе листа 60х600 мм, заштрихованы зоны доверительных интервалов: а – по методу Гаусса; б – по методу Стьюдента

В экспериментальных исследованиях, рис. 13-14, использовали косвенный способ нахождения кривизны с определением первой и второй производных функции $y(x)$, описывающей прогиб, методом конечных разностей. Если показания индикатора с номером i равно y_i , а с номером $i + 1$: y_{i+1} , то приближенное выражение для кривизны в конечных разностях:

$$K_i = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \left[1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)^2 \right]^{-1,5}. \quad (31)$$

Например, при $\Delta x = 20$ мм; $y_i = 62$ мм; $y_{i-1} = 61$ мм; $y_{i+1} = 64$ мм; значение характеристики кривизны: $K_i = 2,5 \cdot 10^{-3} (1 + 0,01)^{-1,5} = 2,488 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$

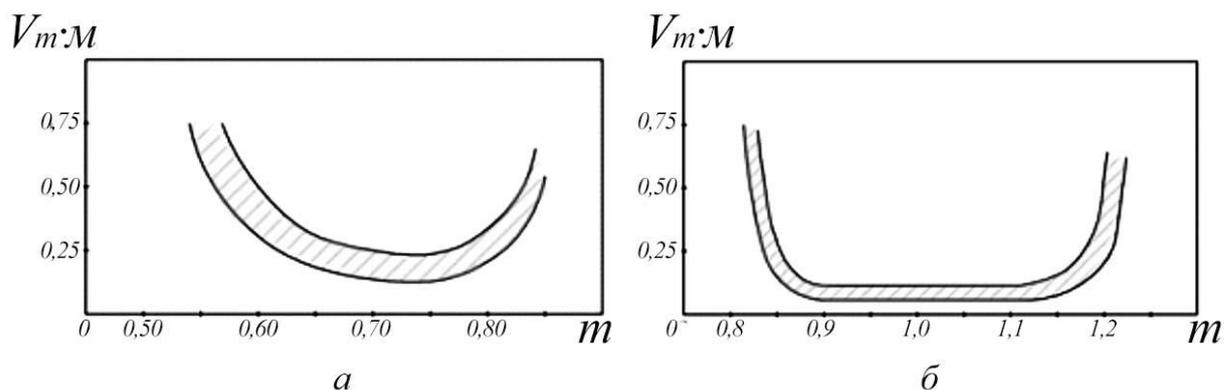


Рис. 13 – Графики изменения относительной величины остаточной кривизны при изгибе двумя равными силами: а – при ($\frac{l_0}{l} = 0,10$); б – при ($\frac{l_0}{l} = 0,15$)

Диапазон усилий деформации: $P_{\max} = \frac{0,833 \cdot 4 \cdot 260 \cdot 0,2 \cdot 10^{-4}}{0,6} = 28,9 \text{ кН};$

$P_{\min} = \frac{0,556 \cdot 4 \cdot 260 \cdot 0,2 \cdot 10^{-4}}{0,6} = 19,3 \text{ кН}.$ Оптимальные диапазоны усилий для

повышения точности кривизны и уменьшения диапазона колебаний этой величины для $\frac{l_0}{l} = 0,10$ соответствуют $m = 0,95 \div 1,15$; при $\frac{l_0}{l} = 0,15$; $m = 0,70 \div 0,80$. При изгибе заготовок из алюминия область разброса величин прогибов и остаточной кривизны в 1,5 – 1,9 раз меньше, чем при изгибе стальных заготовок.

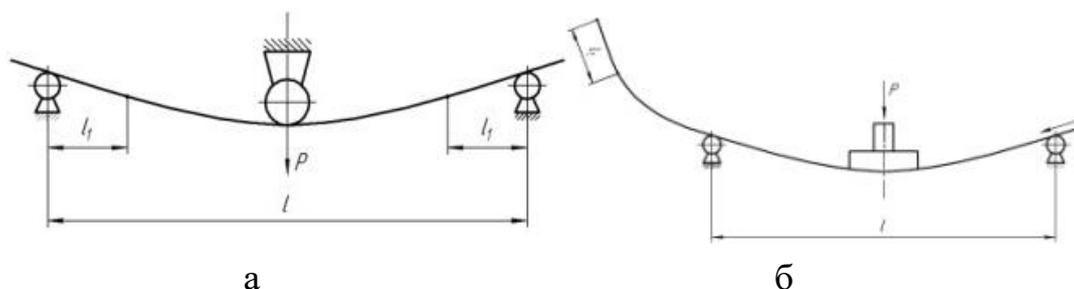


Рис.14 – Схемы деформации изгиба заготовки: а–роликом; б –пуансоном

При пошаговой формовке останутся прямолинейными плоские участки АС и ВС длиной l_1 , рис.14а. При формовке труб диаметрами 1020 – 1420 мм наличие плоских участков снижает их округлость и различие в величинах диаметров трубы достигает 8 – 15 мм. Для прямолинейных участков АС и ВС, рис.15, которым нельзя придать требуемую кривизну в процессе изгиба необходимо применять штамповку концов заготовки, рис.15б.

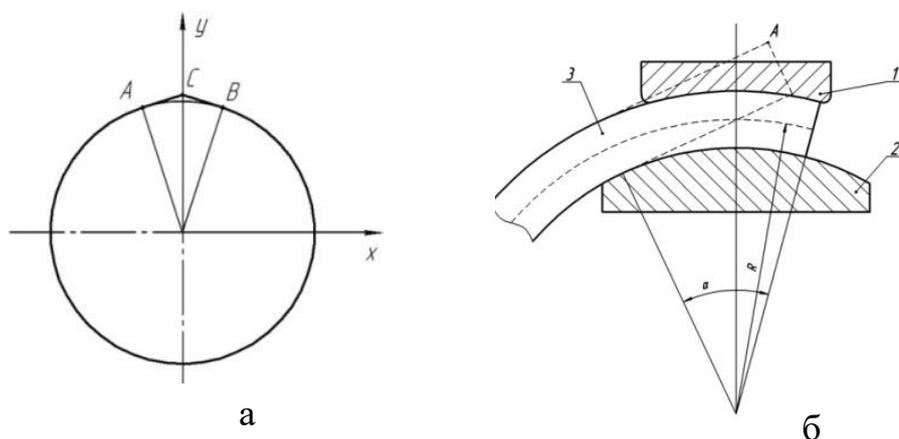


Рис. 15 – Схемы прямолинейных участков при изгибе и штамповке: а – пошаговый изгиб кольцевых заготовок; б – концевых участков заготовки

С целью уменьшения длины прямолинейных краевых участков изгибаемого листа была предложена новая схема изгиба заготовок и конструкция машины для ее реализации, рис.16.

Глава 5 РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗГИБА ЗАГОТОВОК. Главный недостаток схем изгибной деформации заключается в том, что напряжения изменяются по длине деформируемой заготовки и существуют зоны, где деформации остаются упругими вблизи опор деформируемых заготовок, в них изменение кривизны оси заготовки, равно нулю. Для усовершенствования процесса изгиба разработана машина, рис.16, в которой деформируемая заготовка – 1; 2 и 3 – опорные, 4 и 5 – гибочные ролики, установлены на балке 6 и шарнире 7, вертикальное перемещение – от гидравлического цилиндра 8 на станине 9, втулка 10 ограничивает угол поворота балки 6.

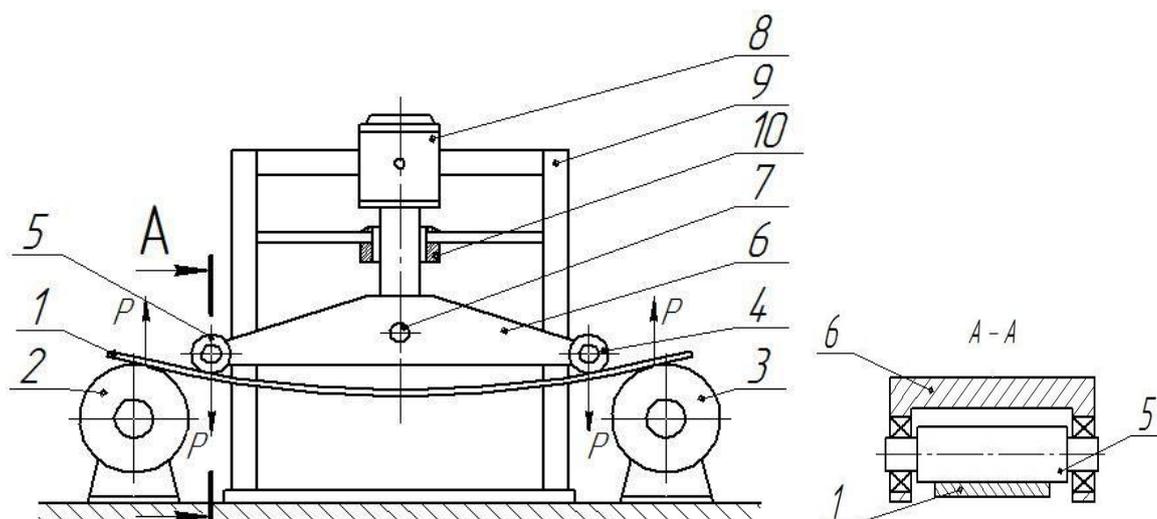


Рис. 16 – Конструкция машины для изгиба заготовок

При равенстве расстояний от оси шарнира 7 до осей гибочных роликов 4 и 5: усилия на роликах 4 и 5 равны $P_1 = P_2 = P$ независимо от колебаний толщины заготовки 1, ее механических свойств и начальной кривизны. Устройство с диаметрами опорных роликов 50 мм и гибочных роликов 40мм при $l_1=0,5\text{м}$ и $l = 10\text{м}$ (а также $l_1 = 0,05\text{м}$, и $l = 0,10\text{м}$) было изготовлено НИИПТМАШ. В качестве нагружающего устройства использовали пресс усилием 0,5 МН. Гидравлический привод при давлении рабочей жидкости 50 МПа и диаметре цилиндра 0,1м обеспечил усилие 400 кН для изгиба и стальных и алюминиевых листов толщиной до 10 мм и шириной до 500мм.

В данной конструкции, рис.17, усилия на роликах 4 и 5 всегда равны, обеспечивая постоянство изгибающего момента (и изгибающих напряжений) по всей длине на участке между роликами 4 и 5. Постоянство изгибающего момента означает и постоянство кривизны, т.е. повышение ее точности. Предложенная конструкция (патент РФ №2561937) обеспечивает уменьшение степени «локальности» деформации – зона пластической деформации увеличивается. Упругие зоны по краям заготовки остаются, но их длина уменьшена.

Глава 6 ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Рассмотрены принципы проектирования ковочных машин, в которых для уменьшения потерь тепловой энергии осуществляют локальный нагрев концевых участков заготовок в рабочем положении перед началом деформации. Для повышения точности и предотвращения искажений конфигурации деформируемых заготовок, рис. 16, концевой участок длиной 120 – 150 мм зажимают в матрицах 2 и 3, вводят во внутреннюю полость заготовки центрирующий стержень 4. Перемещение пуансона 5 реализует пластическую деформацию участка трубы при температуре 1100–1130⁰С.

При формировании фланца, рис.17, на конце трубы 1 наружным диаметром d с толщиной стенки h после нагрева индуктором ее концевой участка длиной 70 - 80мм, зажимают в матрицах 2 и 3 на длине 120–200 мм. Пуансон 4 с внутренним направляющим стержнем 5 формирует фланец 6 диаметром d_0 и толщиной h_0 , который образует с трубой 1 единое изделие.

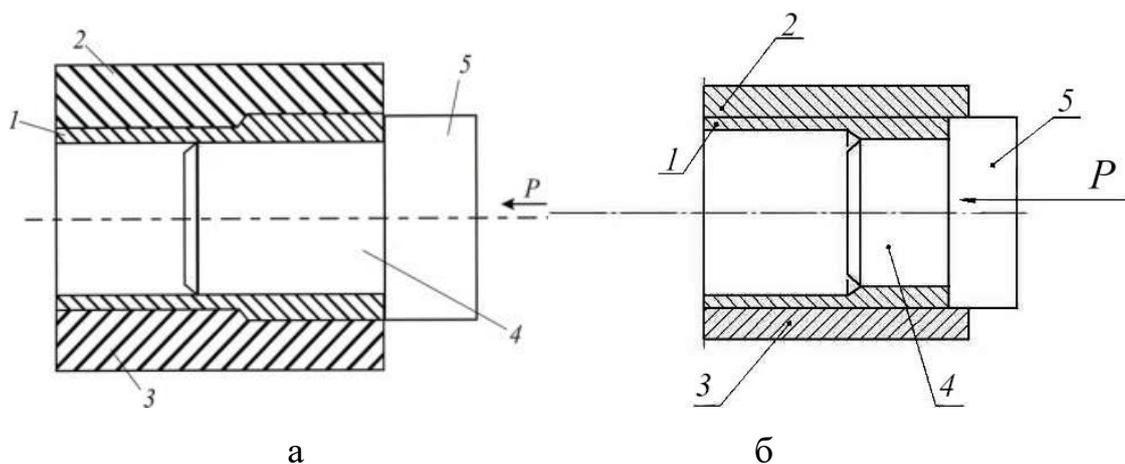


Рис.17 – Схемы деформации при высадке концевых участков труб: а – с наружным утолщением; б – с внутренним утолщением

По схеме локальной деформации с формированием фланца на краю полый заготовки, рис.18 для определения усилий деформации используем метод верхних оценок с построением кинематически допустимых полей

скоростей: $V_r = \frac{V_0}{2l}r, V_z = -\frac{V_0}{l}z$, где V_0 – скорость пуансона; компоненты тензора скорости деформации

$$\varepsilon_r = \frac{\partial V_0}{\partial r} = V_{r,r} = \frac{V_0}{2l}; \varepsilon_z = \frac{\partial V_z}{\partial z} = V_{z,z} = -\frac{V_0}{l}; \varepsilon_\theta = -\frac{V_0}{l}.$$

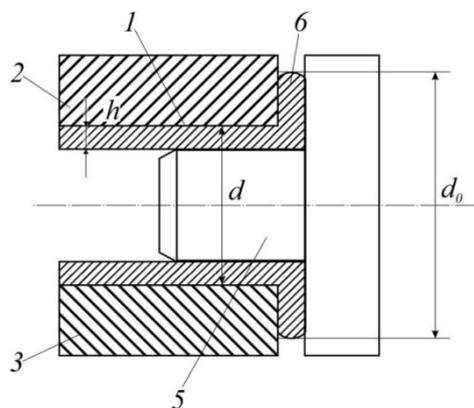


Рис.18 – Схема локальной деформации полых заготовок сформированием фланца

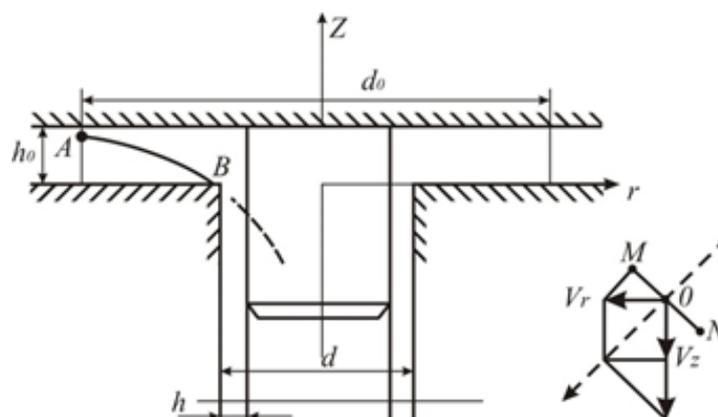


Рис. 19 – Кинематически допустимое поле скоростей для деформации осадки концевой участка трубы

Зона, расположенная выше поверхности АВ движется как жесткое тело со скоростью пуансона V_0 , а в зоне ниже этой поверхности имеем указанное выше, поле скоростей. Кинематически допустимое поле скоростей для осадки трубы и получения фланца, рис.19, предусматривает наличие жесткой зоны, примыкающей к контактной поверхности. Поверхность АВ, образована вращением этой линии вокруг оси Z. В любой точке О проекции скоростей обеих зон на нормали к поверхности «n» должны быть для обеих зон равны. Поверхность АВ разделяет зону деформации на две части: часть металла, расположенная ниже этой поверхности деформируется, а металл,

расположены выше АВ, движется со скоростью $V_z = -V_0 = \text{const}$ совместно с деформирующим инструментом, как жесткое тело. Если нормаль «n» построена в точке О, то проекции скоростей V_r и V_z нижней зоны, и скорости $V_z = -V_0$ на нормаль должны быть равны. Такая поверхность является параболоидом, при $r = \frac{d}{2}$; $Z(r) = h_0(1 - \frac{d^2}{4r^2})$. Мощность формоизменения N_1 равна $N_1 = 0,25\pi k\sqrt{3}V_0d^2(A^2 - 1 - 2\ln A)$, где $A = \frac{d_0}{d_1}$, а мощность сил трения $N_2 = \frac{\pi k V_0 d^3}{24h_0}(A^3 - 1)$.

Мощность среза вдоль поверхности вращения АВ:

$$N_3 = \int_{0,5d}^{0,5d_0} 2\pi k r \Delta V \sqrt{1 + \left(\frac{dz_0}{dr}\right)^2} dr = \frac{\pi k V_0 d^3}{24h_0}(A^3 - 1) \left(1 + \frac{4h_0^2}{d^2 A^2}\right).$$

Приравняв эти величины: $N_1 + N_2 + N_3 = p \frac{\pi}{4}(d_0^2 - d^2)$, получим

$$\frac{p}{\sigma_T} = 1 - \frac{2\ln A}{A^2 - 1} + \frac{A^2 + A + 1}{3\sqrt{3}(A + 1)} \frac{d}{h_0}$$

Например, при $\frac{d_0}{h_0} = 12$, $A = 1,4$ величина $\frac{p}{\sigma_T} = 4,5$.

Если $\frac{d_0}{h_0} = 8$, $A = 1,25$ получим: $\frac{p}{\sigma_T} = 1 - \frac{2\ln 1,25}{0,5625} + \frac{3,8 \cdot 1,25}{3\sqrt{3} \cdot 2,25} \cdot 8 = 2,8$.

Согласно этим расчетам усилие, требуемое для деформации фланца при использовании поля скоростей с жесткой зоной меньше, чем для поля без жесткой зоны.

Для формирования на трубе наружным диаметром $d = 60$ мм и внутренним $d_1 = 50$ мм фланца толщиной $h_0 = 15$ мм, рис. 18, принимаем длину выступающей из матриц части трубы $l = 20$ мм. Примеры осциллограмм усилий, рис. 20 а, б, при локальной деформации заготовок из стали 36Г2С при $t = 900-930^\circ\text{C}$, $d_0 = 70$ мм, $d = 60$ мм, $d_1 = 50$ мм, $\sigma_T = 100 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, усилие достигает $0,33 - 0,35$ МН.

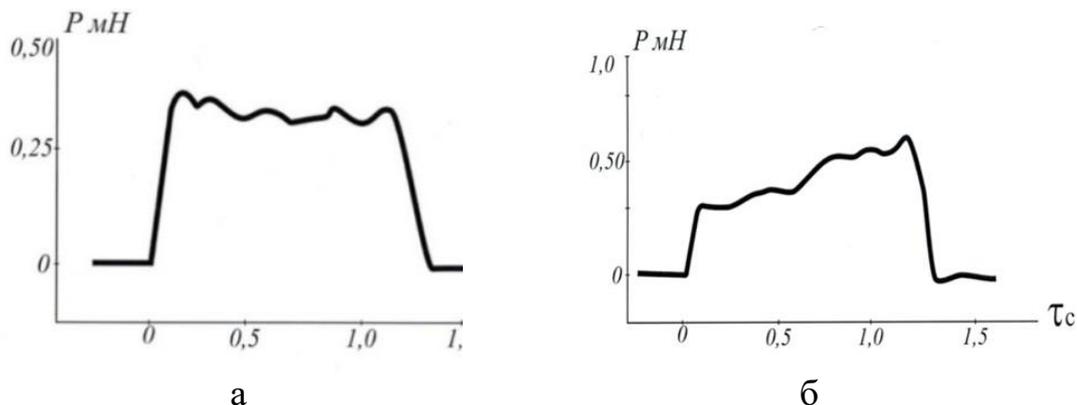


Рис. 20 – Исследование высадки концевых участков полых заготовок (графики изменения усилий при деформации труб диаметрами 50 мм): а – из Ст3; б – из стали 36Г2С

На основании экспериментальных исследований показано, что для формирования участков увеличенной до 10–12 мм толщины на заготовках диаметрами до 50–65 мм толщинами до 5 мм из углеродистых сталей и сталей типа 36Г2С, необходимы ковочные машины усилиями до 0,85–0,90МН. Полученные данные были использованы при проектировании новых ковочных машин.

Для возможности локальной деформации криволинейных полых заготовок (с осями в виде дуг окружностей) была предложена ковочная машина (патент № 2561937), рис.21.

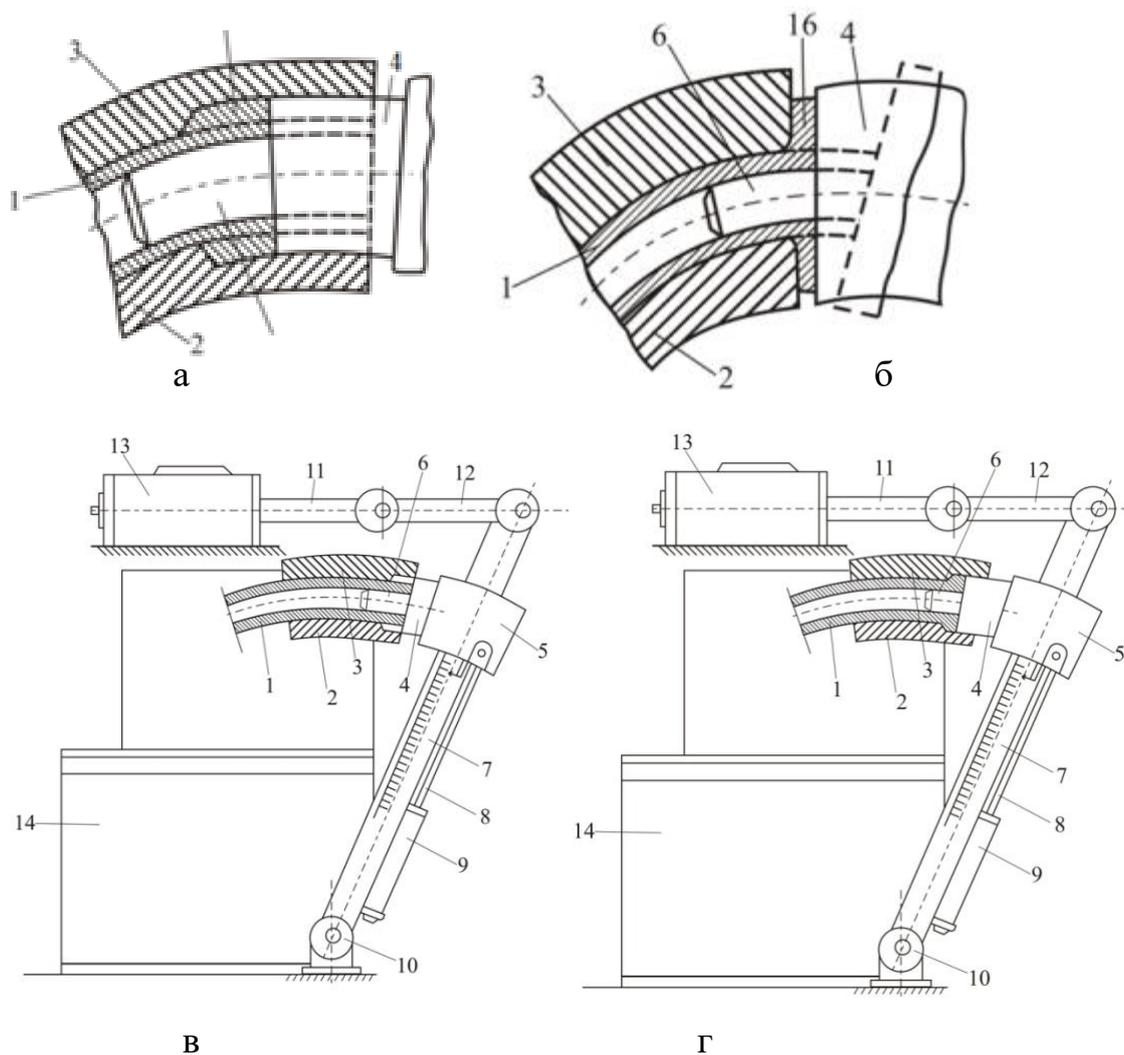


Рис.21– Конструкция новой ковочной машины: схемы деформация концевых участков заготовок переменного сечения: а с наружным утолщение; б – криволинейных; в – положение пуансона до начала деформации; г – положение пуансона после завершения деформации

В данной конструкции сохраняется идея: создать локальную деформацию в ограниченном объеме, что обеспечивает устойчивость заготовки и высокую точность, поскольку объем, занимаемый металлом в процессе деформации, строго ограничен и траекторией движения инструмента является дуга окружности с центром на оси 10, но различных радиусов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Исследованы три вида процессов ОМД с локальной пластической деформацией: вытяжка цилиндрических заготовок, изгиб и высадка полых заготовок. Развитие современных способов ОМД предложено в новом подходе к изготовлению тонкостенных цилиндрических заготовок. При вытяжке стаканов (полых изделий из листов) локальную деформацию: выдавливание выступов специально осуществляют ранее, чем общую деформацию вытяжки. Ее создают для изменения общей деформации. Такая «предварительная» локальная деформация обеспечивает увеличение общей деформации изделия, позволяя повысить качество полых заготовок, расширить их сортамент. Изучена устойчивость процесса вытяжки, выявлены причины искажения формы заготовки и образования складок (волнистости). Определены радиальные и тангенциальные напряжения. Показано, что создание на заготовке локальной деформации углублений малых размеров предотвращает возникновение крупных складок и позволяет в 2,0-2,5 раза увеличить длину изделия без потери устойчивости и образования трещин. Новизна технических и конструкторских решений защищена патентом РФ № 2491144.

2. Выполнены теоретические исследования процессов локальной деформации с определением энергосиловых параметров методом построения кинематически допустимых полей скоростей при вытяжке цилиндрических заготовок, изгибе и высадке концевых участков труб, позволяющие уточнить верхнюю оценку мощности деформации.

3. Разработана методика оценки влияния технологических параметров деформации изгиба на точность размеров и кривизну заготовки. Показано, что при изгибе заготовки одной силой, приложенной между двумя опорами, пластическую деформацию (а значит изменение кривизны) нельзя создать на длине превышающей $1/3$ длины заготовки.

4. На основании теоретических и экспериментальных исследований показано, что существенное влияние на точность размеров, изготавливаемых изгибом, оказывает интенсивность упрочнения деформируемого металла. Чем меньше интенсивность упрочнения, тем ниже точность, как по величинам прогибов, так и по величинам остаточной кривизны после деформации и разгрузки. При низком упрочнении могут образовываться локальные участки с увеличенной кривизной и вблизи них сосредоточена деформация.

На основании расчетов и экспериментов показано, что изгиб двумя силами предпочтительнее, чем одной силой, приложенной в середине пролета.

5. По материалам диссертационной работы разработана методика расчета точности размеров деформируемых заготовок и усовершенствованная технология изгиба, которая позволяет в 2,0-2,5 раза уменьшить разброс величин относительных изменений кривизны и прогибов. Разработана машина для изгиба новой конструкции с двумя роликами, установленными на траверсе, которая имеет возможность вращения относительно оси расположенной на жестком блоке (патент РФ №2547977).

6. Разработанные теоретические положения реализованы при создании и промышленном освоении нового оборудования:

– на Тверском предприятии ООО «Оконные системы» для изготовления труб повышенной точности с утолщенными концевыми участками;

– на Тверском предприятии ОАО «2462 ЦБПР» технологического оборудования для осесимметричной глубокой вытяжки тонколистовых заготовок при изготовлении 24 тысяч изделий корпусов масляных фильтров.

- разработан и испытан на предприятии ООО «Оконные системы» экспериментальный образец машины новой конструкции для изгиба заготовок в условиях действия постоянного изгибающего момента на длине

до 0,7 – 0,8 общей длины деформируемой заготовки, позволяющий более, чем в два раза повысить точность деформации изгиба.

Основное содержание работы изложено в следующих работах:

Статьи:

1. Бровман Т.В., Бабенко Н.Е. Локальная пластическая деформация полых заготовок[текст]/ Т.В. Бровман, Н.Е. Бабенко //Металлы. -2014.№4. С.23–29.
2. Бровман Т.В. Конструкция сварного двухслойного трубопровода[текст]/ Т.В.Бровман // Сварочное производство. -2011, №2, с.31-33.
3. Бровман Т.В. Кинематически допустимые поля скоростей при радиальном обжати цилиндрических заготовок[текст] / Т.В.Бровман // Изв. Вузов.Чер. Металлургия, 1993. №7. С. 29 – 33.
4. Бровман Т.В.Локальная деформация труб с криволинейными осями// Сборник материалов DFMN–2015VI – Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». 10–13 ноября 2015 г. Москва, ИМЕТ РАН.– С.336.
5. Бровман Т.В. Разработка методики расчета точности и исследование кривизны при деформации изгиба // Сборник материалов DFMN–2017 VII - Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». 7-10 ноября 2017г. Москва: ИМЕТ РАН. - С.65.
6. Бровман Т.В. Усилия при локальной деформации полых заготовок [текст]/ Т.В.Бровман //Технология металлов. 2015. № 6. С. 9–13.
7. Бровман Т.В., Кутузов А.А. Определение усилий подгибки в штампах кромок стальных кольцевых заготовок/[текст]Т.В. Бровман, А.А.Кутузов.// Производство проката. 2015. № 2. С. 18 – 23.
8. Бровман Т.В., Васильев М.Г. Способ вытяжки осесимметричных заготовок с их предварительной деформацией /[текст] Т.В.Бровман, М.Г.Васильев. //Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 5. С. 20 – 22.
9. Бровман Т.В., Васильев М.Г. Модель численных расчетов искусственной анизотропии при деформации тонколистового металла/[текст] Т.В. Бровман,

М.Г. Васильев // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. 2014. № 2. С. 25 – 32.

10. Бровман Т.В., Кутузов А.А. О выборе режимов изгиба при вальцовке заготовок/[текст] Т.В. Бровман, А.А.Кутузов // Производство проката. -2014. № 12. С. 29–32.

11. Бровман Т.В. Утилизация изношенных транспортных средств/[текст]Т.В.Бровман // Вестник машиностроения.- 2011. № 9. С. 30–32.

12. Бровман Т.В. Энергосиловые параметры при деформации листовых заготовок/[текст] Т.В.Бровман // Производство проката.- 2012. № 6. С. 27–32.

13. Бровман Т.В. Определение усилий при листовой штамповке [текст]/ Т.В. Бровман // Вестник машиностроения.– 2004.–№3.С.61–63.

14. Бровман Т.В. Определение усилий при изготовлении заготовок пластической деформацией листового металла [текст]/ Т.В. Бровман // Вестник машиностроения.–2002.–№12.С. 52–57.

15. Brovman T.V. New technological process of drawing [text]/T.V.Brovman, M.G. Vasiljev// Journal of Harmonized Research in Engineering (JOHR). - 2014.№ 2.Р. 201–207.

16. Бровман Т.В. Определение верхних оценок при обработке давлением с определением размеров зоны пластической деформации Т.В.Бровман // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1991.№9.С.38–39.

17. Бровман Т.В., Кутузов А.А. Повышение точности при изготовлении криволинейных металлических заготовок деформацией изгиба [текст]/ Т.В. Бровман, А.А. Кутузов //Металлы.–2016, №3.С.92–100.

Авторские свидетельства и патенты:

18. Пат. RU № 2547977 РФ, МПК В21J 5/Ковочная машина для формирования концевых участков криволинейных труб [текст]/Т.В.Бровман, Н.Е. Бабенко (заявка 2013155640/02 приоритет 13.12.2013, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации, опубл.10.04.2013). Бюл. 2015, №10

19. А.С. № SU 1477485A1B21 1/08, B21D5/06 Двухвалковый калибр прокатного стана/ Бровман Т.В., заявл. 16.10.87; опубл.07.05.89. Бюл. №17.
20. Пат. RU № 2556172 РФ, МПК B21 D22/20. (13) C1 Способ изготовления полых цилиндрических изделий/ Т.В. Бровман (заявка № 2013158390) приоритет изобретения 26 декабря 2013, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 15 июня 2015 г., опубл.10.07.2015 Бюл. № 19.
21. Пат. RU № 2608153 РФ, МПК B21D15/02 Способ изготовления полых заготовок с внутренними выступами / Т.В.Бровман, А.А.Кутузов (заявка 2015110274/02 (016163) приоритет 23.03.2015, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации, опубл.10.10.2016.Бюл.№28.
22. Пат. RU 2554247 C2, РФ, МПК B21 D 22 /20 Способ изготовления тонкостенных изделий / [текст] Т.В.Бровман ,опубл. 27.06.2016 Бюл.№18.
23. Патент № 2491144 RU(11) C2 Российская федерация, B21D 22/20 (2006.01). Способ изготовления полых цилиндрических изделий [текст]/ Т.В. Бровман, А.Б. Горященко, М.Г.Васильев заявлено 08.06.2011, опубликовано 27.08.2013. Бюллетень №24.
24. Патент № 2561937 RU(11) C1 Российская федерация, B21D 22/20 (2006.01). Машина для изгиба заготовок [текст]/ Т.В.Бровман, А.А.Кутузов заявлено 30.05.2014, опубликовано 10.09.2015. Бюллетень №25.