


На правах рукописи



Васильев Михаил Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИСТОВОЙ  
ШТАМПОВКИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА  
СТАЛЬНЫХ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ,  
ПОЛУЧАЕМЫХ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКОЙ**

**Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тверь - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном  
учреждении высшего профессионального образования «Тверской  
государственный технический университет» (ТвГТУ)

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент  
**Бровман Татьяна Васильевна**

Официальные оппоненты - **Кохан Лев Соломонович**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
технологии и оборудования металлургических  
процессов ФГБОУ ВПО «Московский  
государственный машиностроительный  
университет (МАМИ)»

- **Лисунец Николай Леонидович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
технологии и оборудования трубного  
производства ФГБОУ ВПО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСиС»

Ведущая организация - ФГБОУ ВПО «МАТИ» – Российский  
государственный технологический  
университет имени К.Э.Циолковского

Защита диссертации состоится 29 октября 2014 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д 002.060.02 при Федеральном государственном  
бюджетном учреждении науки Институте металлургии и материаловедения им.  
А.А.Байкова Российской академии наук по адресу: г.Москва, Ленинский пр.,49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  
<http://www.imet.ac.ru> ИМЕТ РАН.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных  
печатью, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба  
отправлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект 49,  
Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде  
направлять по e-mail: [kalash.ds@mail.ru](mailto:kalash.ds@mail.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ сентября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук



Калашников И.Е.

## Общая характеристика работы

**Актуальность** Исследованию и совершенствованию процессов обработки металлов давлением были посвящены многие работы А.А. Ильюшина, Н.И. Безухова, Н.Н. Малинина, А. Надаи, Р. Хилл, И.П. Ренне, И.Л. Перлина, Г.А. Смирнова-Аляева и других ученых. От качества проката, в частности его разнотолщинности, во многом зависит и качество изделий, получаемых из листа в процессе вытяжки. Большие работы по усовершенствованию процессов обработки давлением были проведены ЦНИИТМАШ, МГТУ им. Н.Э.Баумана, в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, МИСИС, в институте "Цветметобработка", Череповецком государственном университете, Тульском государственном университете, МГТУ "Станкин" и других организациях. Однако, следует указать, что на практике часто встречаются трудности из-за потери устойчивости процесса деформации и возникновения искажений формы изделия, в частности, складок или фестонов. В ряде случаев возникают кольцевые трещины, приводящие к дефектам продукции. Это свидетельствует об актуальности исследований, направленных на повышение качества изделий, производимых вытяжкой, и увеличения количества годных.

**Целью диссертационной работы** является исследование и совершенствование технологического процесса изготовления тонколистовых осесимметричных заготовок, при вытяжке изделий цилиндрической формы. Обеспечение возможности расширения сортамента при изготовлении изделий вытяжкой.

### **Задачи исследований**

1. Исследование напряженного состояния и определение верхней границы усилий с использованием кинематически допустимого поля скоростей.
2. Разработка метода расчета возможных отклонений силовых и технологических параметров при изменениях размеров заготовки, ее механических свойств и сил трения.

3. Экспериментальное исследование способа и его практическое применение для изготовления ряда изделий осесимметричной формы на ОАО «2462 ЦБПР».

#### **Научная новизна**

Теоретически обоснованы положения усовершенствованного технологического процесса вытяжки изделий из тонколистового проката, определены величины допустимых деформаций в процессе формообразования на основе условий текучести Сен – Венана и Мизеса. Разработана методика расчета погрешностей отклонения усилий и параметров, характеризующих устойчивость процесса вытяжки.

**Практическая значимость работы** На основании проведенных исследований усовершенствованный технологический процесс применен в крупносерийном производстве корпусов фильтров двигателей семейства Д-248, Д-144, КАМАЗ 740.14-300, коробок противогоза типа ППФ-95.

**Личный вклад соискателя** Личное участие автора заключалось в постановке задач исследований, проведении экспериментов, получении основных научных результатов и в усовершенствовании и внедрении технологического процесса глубокой вытяжки стальных полых цилиндрических изделий.

**Апробация работы** Основные положения и результаты работы были доложены и обсуждены на научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов ФГОУ ВПО ТвГТУ(г. Тверь) 2006-2012г; на V международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» г. Москва в 2013 году.

**Публикации** По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 2 в изданиях рекомендованных перечнем ВАК РФ, получено 2 патента РФ.

**Структура и объем работы** Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и списка литературы включающего 109 наименований. Диссертация изложена на 101 странице, содержит 45 рисунков и 7 таблиц. Приложения составляют 16 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Обзор современных способов вытяжки изделий из тонколистовых заготовок

Вытяжкой получают полые детали разнообразной формы, обычно из плоских листовых заготовок, не требующих, как правило, дальнейшей обработки, кроме обрезки неровного края. К таким деталям относятся - изделия, имеющие форму тел вращения (осесимметричные), детали коробчатой формы, детали имеющие одну ось симметрии или асимметричные, цилиндрические детали, переменной толщины, у которых толщина дна больше толщины стенок.

Известно, что при изготовлении цилиндрических изделий вытяжкой из тонкого листа вследствие сжатия заготовки в тангенциальном направлении возможна потеря устойчивости и образование крупных складок (их называют «ушками» см. Р Хилл). Потеря устойчивости ограничивает допустимую длину изделий, которые можно получать вытяжкой. Ясно, что если наружный радиус плоской заготовки в форме круга равен  $R_0$ , а радиус стакана  $R_1$ , то материал заготовки испытывает сжатие при степени деформации  $\varepsilon = \ln \frac{R_0}{R_1}$ . Именно это сжатие вызывает потерю устойчивости и плоской конфигурации диска (обычно за счет возникновения «волн» - выступов значительной амплитуды порядка  $10h$ , где  $h$  – толщина листа). В работах ученых Тульского Политехнического института приведены данные исследований плоского напряженного состояния анизотропных материалов и влияния напряженного состояния на предельную степень вытяжки. Условие текучести принято в виде:  $k_1\sigma_r^2 + k_2\sigma_\theta^2 + k_3(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 = P(u)$ ; где:  $k_1, k_2, k_3$  – постоянные, характеризующие анизотропию, причем  $k_1 = k_2$ ,  $\sigma_r, \sigma_\theta$  - компоненты напряжений,  $u$  - параметр, характеризующий напряженное состояние, а функцию  $P(u)$  приняли в виде:  $P(u) = 1 + P_1(u - 1) + P_2(u - 1)^2$ ;  $P_1, P_2$  - постоянные, определяемые экспериментально (для стали 40 было принято  $P_1 = 0,46$ ;  $P_2 = 0,20$ ). Показано,

что предельная степень вытяжки возрастает с увеличением коэффициента анизотропии и может увеличиться в 1,12-1,18 раз.

Если при вытяжке полого цилиндра увеличивать силу прижима, сохраняя без изменения все остальные условия, то склонность к образованию складок уменьшается. Условие обеспечения потери устойчивости в работе Л.А. Шофмана сформулировано в виде  $\frac{R_0 - R_1}{h} \leq C$ , где  $C$  – некоторая постоянная, зависящая от материала, его термообработки, условий смазки и температуры;  $R_0$  - начальный радиус заготовки;  $R_1$  - радиус стакана;  $h$  - толщина листа. Это условие существенно ограничивает допустимое соотношение величин  $R_0/R_1$  и следовательно длины заготовки.

В связи с изложенным, необходимо провести исследование процесса обработки давлением – вытяжки изделий цилиндрической формы из тонколистового металла и совершенствование технологического процесса вытяжки, который позволит увеличить выход годного и расширить номенклатуру изделий, изготавливаемых вытяжкой.

## **2. Прогрессивная технология изготовления осесимметричных изделий**

Для определения напряжений и усилий, необходимых для реализации процессов обработки давлением используют современные методы теории пластичности, разработанные советскими и зарубежными учеными: А.А. Ильюшиным, С.А. Христиановичем, Л.М. Качановым, В.В. Соколовским, Д.Д. Ивлевым, Б. Сен-Венаном, Д. Друкером, А. Надаи, Р. Хиллом, В. Прагером и другими учеными. Для решения технологических задач вытяжки тонколистовых осесимметричных деталей принимаем краевые условия для напряжений  $\sigma_r = 0$ , при  $r=R_0$ : из уравнения равновесия получаем  $\sigma_r = 2k \ln \frac{R_0}{r}$ , а компонента тензора напряжений  $\sigma_\theta$  равна  $\sigma_\theta = 2k \ln \frac{R_0}{r} - 2k = 2k \left( \ln \frac{R_0}{r} - 1 \right)$  при предельной величине  $\frac{R_0}{r} = e$ ; когда  $\sigma_r = 2k$ ;  $\sigma_\theta = 0$ ; реально достижимые

параметры  $\frac{R_0}{r} = 2,2 \dots 2,5$ . Графики изменения величин  $\frac{\sigma_r}{k}$  и  $\frac{\sigma_\theta}{k}$ , полученные при условии Треска, приведены на рисунке 1а

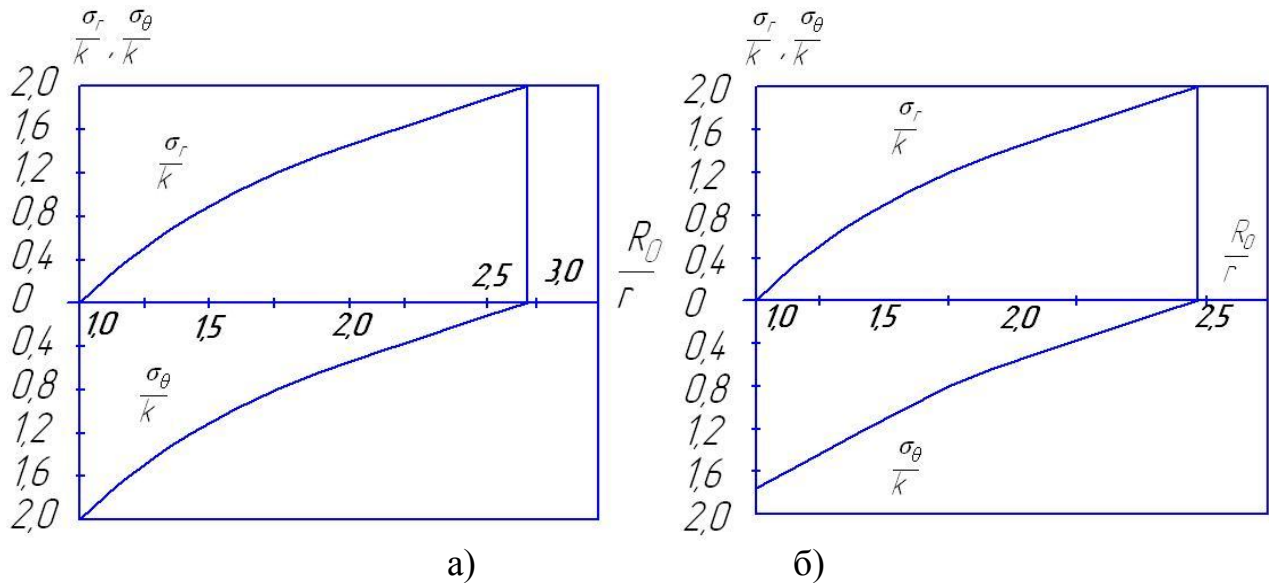


Рис. 1 - Графики изменения напряжений в деформируемой заготовке: а-при условии текучести Треска; б-при условии текучести Мизеса

По условию текучести Мизеса напряжения:  $\sigma_\theta = 0,5(\sigma_r \pm \sqrt{3}\sqrt{4k^2 - \sigma_r^2})$ , а с учетом краевого условия  $\sigma_r = 0$  при  $r = R_0$  эта формула имеет вид:

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

графики напряжений  $\frac{\sigma_r}{k}$  и  $\frac{\sigma_\theta}{k}$ , представлены на рисунке рис.1б. Результаты, полученные из условий текучести Сен-Венана и Мизеса дают близкие значения предельных величин  $\frac{R_0}{R_1}$ : равные 2,7 и 2,49 соответственно, при которых достигаются величины  $\sigma_\theta=0$  при  $\sigma_r = 2k$ , или  $\sigma_r = k\sqrt{3}$ , когда возможно появление трещин. Сопоставление теоретических величин с тем значением, которое достижимо в реальных условиях деформирования, дает представление о степени качества технологического режима вытяжки и способа его улучшения.

Схема деформации, по мере увеличения длины стакана, приведена на рисунке 2. В начальной стадии деформации, величина  $R_0$  максимальна и напряжение  $\sigma_r$  при  $r=R_1$  равно:  $\sigma_r = 2k \ln \frac{R_0}{R_1}$ . Максимальное по модулю

напряжение  $\sigma_\theta = 2k$  при  $r=R_0$ ; эпюры напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  также приведены на рис. 2.

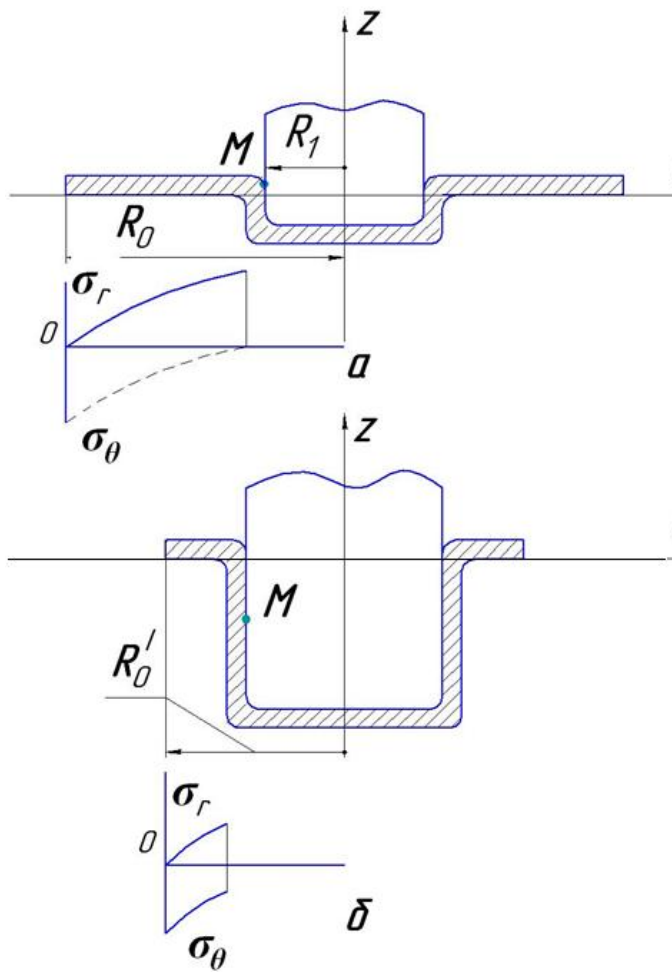


Рис. 2 – Схема деформации тонколистовой заготовки: а - начальная стадия деформации; б - при  $r=R_0'$ ;

точку М, рис. 2а. В положении на рис. 2а в этой точке  $\sigma_r = 2k \ln \frac{R_0}{R_1}$ ,  $\sigma_\theta = 0, \sigma_z = 0$ , но когда она перейдет в положение М на рис. 2б, для нее можно принять  $\sigma_r = 0, \sigma_\theta = 0, \sigma_z \neq 0$  поскольку  $\sigma_z = \frac{P}{2\pi R_1 h}$ ; (P – усилие вытяжки). Произошло существенное изменение напряженного состояния заготовки, но сечение «кольца», равное  $R_0' \times h$ , по мере вытяжки стакана уменьшается (а напряжения сжатия по модулю не уменьшаются). Поэтому сохраняется опасность потери устойчивости и образования складок, когда нарушается плоская форма «кольца».

По мере движения пуансона наружный радиус  $R_0$  уменьшается до величины  $R_0'$  см. рис. 2б, и теперь максимальное радиальное напряжение действует на другой участок металла. По мере перехода металла через зоны перегиба, изменяется его напряженное состояние и напряжение  $\sigma_r$  переходит в напряжение  $\sigma_z$  по мере перехода металла из плоского диска в цилиндрический участок тела. При этом наибольшее напряжение  $\sigma_r$  уменьшается, но максимальные (по модулю) напряжение  $\sigma_\theta$  действует на один и тот же объем металла – у краев плоского диска, т.е. при  $r = R_0$  на рис. 2а и при  $r=R_0'$  на рис.2б.

Выберем, например произвольную



Образование фестонов («ушкообразование») вызвано анизотропией, оно отличается от потери устойчивости в случае образования «волн» на участке  $R_0' \geq r \geq R_1$ . Появление фестонов, например, для ряда сплавов латуни приводит к увеличению обреза и потерям металла. Появление волн, возможно и в завершающей стадии вытяжки, что также приводит к увеличению обреза и неисправимым дефектам.

Для определения верхней границы мощности и усилия деформации построено кинематически допустимое, поле скоростей (рис.3), состоящее из двух зон, одна из которых движется как жесткое тело в направлении, параллельном оси  $z$ , в этой зоне скорости равны:  $V_z = -V_0$ ;  $V_r = 0$ . Вторая зона, имеющая форму диска, с наружным радиусом  $R_0$  соответствует полю скоростей:  $V_r = -V_0 \frac{R_1}{r}$ ;  $V_z = 0$ . Граничная поверхность, на которой равны нормальные компоненты векторов скоростей для обеих зон является параболоидом вращения, уравнение этой поверхности в координатах  $r, z$  (рис.3) имеет вид:

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

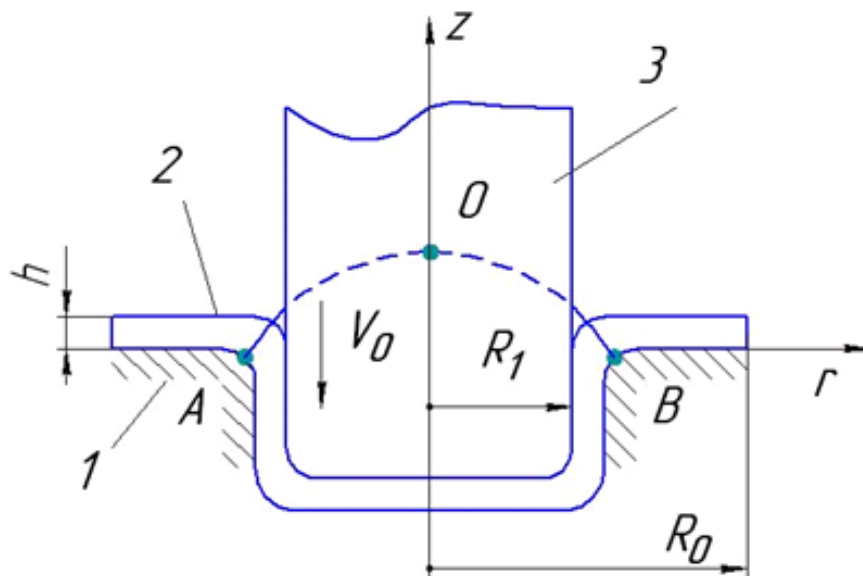


Рис.3 – Схема осесимметричной деформации

Во внешней кольцевой зоне реализуется радиальное течение, компоненты тензора скорости деформации  $\varepsilon_r = v_0 \frac{R_1}{r^2}$ ;  $\varepsilon_\theta = -v_0 \frac{R_1}{r^2}$ ;  $\varepsilon_z = 0$ , а второй

инвариант этого тензора  $H = 2 \frac{v_0 R_1}{r^2}$ . Мощность деформации в этой зоне определяется интегрированием  $N_1 = \int_{R_1}^{R_0} 2\pi r k h H dr = 4\pi k v_0 R_1 h \ln \frac{R_0}{R_1}$ . На граничной поверхности параболоида АОВ, (рис.3), непрерывны нормальные компоненты векторов скоростей для обеих зон, но тангенциальные компоненты могут иметь и имеют разрыв. Мощность среза на границе двух зон на поверхности АОВ равна:  $N_2 = \int_{R_1}^{R_1+h} 2\pi r k \Delta v \sqrt{1 + (z')^2} dr$ , где:  $\Delta v = \frac{v_0}{z} \sqrt{1 + (z')^2}$  - разрыв тангенциальной компоненты скорости на поверхности параболоида, мощность среза равна:  $N_2 = 2\pi k v_0 R_1 h \left(1 + \frac{h}{2R_1}\right)$ . С учетом трения на опорной поверхности диска полная мощность определена усилием:  $P = \frac{1}{v_0} (N_1 + N_2 + \mu P v_0)$

$$P = \frac{2\pi k R_1 h}{1-\mu} \left(1 + 2 \ln \frac{R_0}{R_1}\right) \quad (3)$$

Например, если  $R_1=0,05\text{м}$ ,  $R_0 = 0,08\text{м}$ ;  $h = 2 \cdot 10^{-3}\text{м}$ ,  $\mu = 0,10$ ,  $\sigma_T = 350 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$ ,  $k = 202 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$   $P = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 202 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{1-0,1} \left(1 + 2 \ln \frac{0,08}{0,05}\right) = 0,14095 \cdot 1,93886 = 0,273 \text{ МН.}$ , т. е.  $P = 273 \text{ кН}$ .

### 3. Расчеты точности определения энергосиловых и технологических параметров

Степень точности определения любого параметра не менее важна, чем его номинальная величина. Разработана методика оценки точности величин усилия вытяжки  $P$  и безразмерного параметра  $f = \frac{R_0 - R_1}{h} < 44$ , равного отношению разности радиусов заготовки и изделия к толщине деформируемого листа  $h$  в форме круга радиусом  $R_0$  заготовки радиусом  $R_1$  и длиной  $l = R_0 - R_1$ . Очевидно, что аргументы функции  $P(k, R_1, R_0, h, \mu)$  всегда известны с некоторой степенью неопределенности, т.е.  $k \pm \Delta k$ ;  $R_1 \pm \Delta R_1$ ;  $R_0 \pm \Delta R_0$ ;  $h \pm \Delta h$ ;  $\mu \pm \Delta \mu$ . Параметры  $R_1, R_0, h$ , известны только с некоторыми погрешностями:  $R_1 \pm \Delta R_1$ ;  $R_0 \pm \Delta R_0$ ;  $h \pm \Delta h$ . Если аргументы некоторой

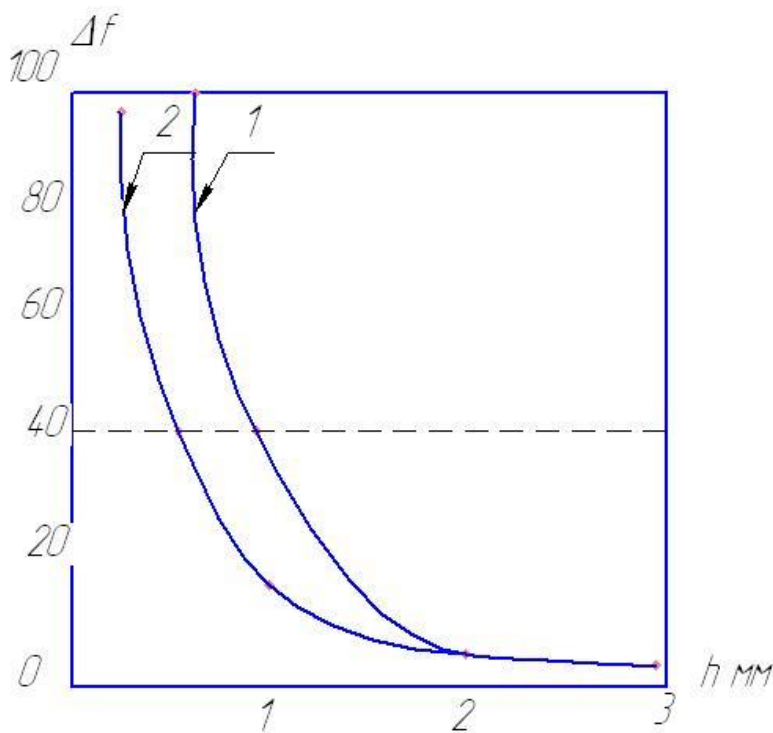


Рис. 4 - График функции  $\Delta f(h)$   $\Delta R_0 > 0$ , а  $\Delta R_1 < 0$  и  $\Delta h < 0$  отклонения, определяемые изменениями всех трех параметров, суммируются. Приняв этот случай,

при  $R_0 = 0,08$  м,  $R_1 = 0,05$  м,  $h = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $f = \frac{0,03}{2 \cdot 10^{-3}} = 15$ , получим  $\Delta f = 15(33,3\Delta R_0 - 33,3\Delta R_1 - 500\Delta h)$ . Если  $\Delta R_0 = 0,01$  мм,  $\Delta R_1 = -0,01$  мм и  $\Delta h = -0,001$  мм, то получим  $\Delta f = 15(0,333 + 0,333 + 0,5) = 17,5$  и поэтому возможны реальные изменения величины  $f$  в диапазоне:  $f = 15 \pm 17,5$  вплоть до величины 32,5. Формула  $\Delta f = \frac{\Delta R_0}{h} - \frac{\Delta R_1}{h} - \frac{(R_0 - R_1)}{h^2} \Delta h$  показывает, что отклонение  $\Delta f$  тем больше, чем тоньше деформируемый лист. Пусть, например, отклонения  $\Delta R_0$  и  $\Delta R_1$  малы и ими можно пренебречь, (приняв  $\Delta R_0 = \Delta R_1 = 0$ ). Тогда при  $R_0 = 8 \cdot 10^{-2}$  м,  $R_1 = 5 \cdot 10^{-2}$  м,  $\Delta h = 10^{-3}$  м график зависимости функции  $|\Delta f| = 3 \cdot 10^{-2} \frac{\Delta h}{h^2} = \frac{3 \cdot 10^{-5}}{h^2}$  приведен на рис. 4 (где она обозначена цифрой 1, пунктиром показана предельно допустимая величина  $f$ ). При больших отклонениях  $\Delta h$ , надо использовать зависимость

$$\Delta f = (R_0 - R_1) \left( \frac{1}{h + \Delta h} - \frac{1}{h} \right) = -\frac{(R_0 - R_1)\Delta h}{h(h + \Delta h)} \quad (4)$$

Например, если  $R_0 - R_1 = 3 \cdot 10^{-2}$  м,  $\Delta h = 1 \cdot 10^{-3}$  м,  $h = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м, то  $|\Delta f| = \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}} = 40$ , а при  $h = 1 \cdot 10^{-3}$  м,  $|\Delta f| = 15$ . На рис.4 линия, соответствующая формуле (4) величина обозначена цифрой 2. Видно, что при

$h > 2 \cdot 10^{-3}$  м, (т.е., при  $\frac{\Delta h}{h} < 0,5$ ) линии 1 и 2 близки. Расчеты показывают, что наибольшее влияние на колебание функции  $f$ , ее отклонений от номинальных значений оказывает разнотолщинность листового проката. Для определения усилия вытяжки с рассмотрением кинематически допустимого поля скоростей получена формула:  $P = \frac{2\pi k R_1 h}{1-\mu} \left(1 + 2 \ln \frac{R_0}{R_1}\right)$  где  $k = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}$  - предел текучести при сдвиге,  $\sigma_T$  - предел текучести при растяжении-сжатии,  $\mu$  - коэффициент трения при скольжении листа по штампу (при радиальном перемещении плоского участка заготовки) и следовательно можно записать возможные изменения функции  $P$  при отклонении аргументов:  $\Delta R_0, \Delta R_1, \Delta k, \Delta h, \Delta \mu$

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta \mu}{\mu-1} + \frac{\Delta R_0}{R_0} \frac{2}{1+2 \ln \frac{R_0}{R_1}} + \frac{\Delta R_1}{R_1} \left( \frac{2 \ln \frac{R_0}{R_1} - 1}{2 \ln \frac{R_0}{R_1} + 1} \right) \quad (5)$$

Примем  $R_0 = 8 \cdot 10^{-2}$  м,  $R_1 = 5 \cdot 10^{-2}$  м, то  $\ln \frac{8}{5} = 0,47$ , то получим:  $\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta \mu}{\mu-1} + 1,03 \frac{\Delta R_0}{R_0} - 0,031 \frac{\Delta R_1}{R_1}$ . Если предел текучести определен со степенью неопределенности  $\pm 0,09$ ; толщина  $\pm 0,04$ ; коэффициент трения  $\pm 0,2$ ; и  $R_0$  с неопределенностью  $\pm 0,04$ , то  $\frac{\Delta P}{P} = 0,09 + 0,04 + \frac{0,2 \cdot 0,2}{0,8} + 0,04 = 0,22$ . Эта величина верхней границы отклонения, когда все четыре переменных  $k, h, \mu, R_0$  имеют такие отклонения, что они суммируются. Фактически для данного примера величины  $\frac{\Delta P}{P}$  будут случайными в диапазоне:  $-0,22 \leq \frac{\Delta P}{P} \leq 0,22$ . При  $\sigma_T = 350 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$ ,  $k = 202 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$ ,  $R_0 = 8 \cdot 10^{-2}$  м,  $R_1 = 5 \cdot 10^{-2}$  м,  $h = 2 \cdot 10^{-3}$  м,  $\mu = 0,2$ :  $P = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 202 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0,8} (1 + 2 \ln 1,6) = 232,94 \approx 233$  кН. Если  $\frac{\Delta P}{P} = 0,22$ , то  $\Delta P = 51$  кН и следует считаться с возможностью отклонения усилия  $P$  от номинальной величины в диапазоне:  $P = 233 \pm 51$ ;  $P = 182 \div 284$  кН

#### **4. Совершенствование технологического процесса листовой штамповки цилиндрических заготовок**

Рассмотрена осесимметричная деформация листовых заготовок при вытяжке. Проведены опыты по образованию волн и определению их количества

Сделан вывод о том, что причиной нарушения устойчивости являются тангенциальные напряжения. Усовершенствован и исследован способ вытяжки, включающий создание на заготовке перед вытяжкой выступов-волн малой амплитуды. Число таких волн должно быть значительным и это дает возможность предотвратить возникновение более крупных складок искажений формы заготовки. Этот способ основан на создании искусственной анизотропии. Для оценки предельной величины соотношения параметров заготовки используем формулы для критических напряжений, (при которых возможна потеря устойчивости)  $\sigma_k = \frac{\pi^2 k_1 E}{12(1-\gamma^2)} \left(\frac{h}{R_0-R_1}\right)^2$ , где  $E$  - модуль упругости;  $\gamma$  - коэффициент Пуассона;  $h, R_0, R_1$ , - размеры кольцевого участка заготовки;  $k_1$  - коэффициент, который зависит от величины отношения  $\frac{R_1}{R_0}$  и изменяется от  $k_1 = 1,49$  до  $k_1 = 2,52$ . Определяем предельное отношение безразмерного параметра:  $A = \left(\frac{R_0-R_1}{h}\right)_k = \sqrt{\frac{\pi^2 k_1 E}{12\sigma_T(1-\gamma^2)}}$ . Если, например, принять для углеродистой стали  $E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$ ,  $\sigma_T = 250 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$ , то получим величину предельного отношения  $\left(\frac{R_0-R_1}{h}\right)_k A = \left(\frac{R_0-R_1}{h}\right)_k = 1,34 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5}{250}} = 37,9 \approx 38$ . Предельная длина цилиндрической заготовки, которую можно получить вытяжкой  $L = 1,34h \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}}$ , а для углеродистой стали при  $\sigma_T = 250 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$ ,  $L = 1,34h \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5}{250}} = 38h$ . На практике эта величина изменяется в достаточно широком диапазоне от  $30h$  до  $60h$ . Были проведены опыты по деформации вытяжкой листов из стали 08Ю толщиной 0,5 мм при величинах  $R_0 = 100$  мм,  $R_1 = 60$  мм. Параметр  $A = \left(\frac{R_0-R_1}{h}\right)$  в данном случае равен 80, т.е., в конечной стадии деформации он выше критического, что и приводило к потере устойчивости и образованию «волн» на кольцевом участке в количестве

$$n = 1,65 \frac{R_0+R_1}{R_0-R_1} = 1,65 \frac{160}{40} = 6,6, \text{ т.е. } n \approx 7 \text{ см. рис.5.}$$

На основании проведенных исследований был предложен технологический

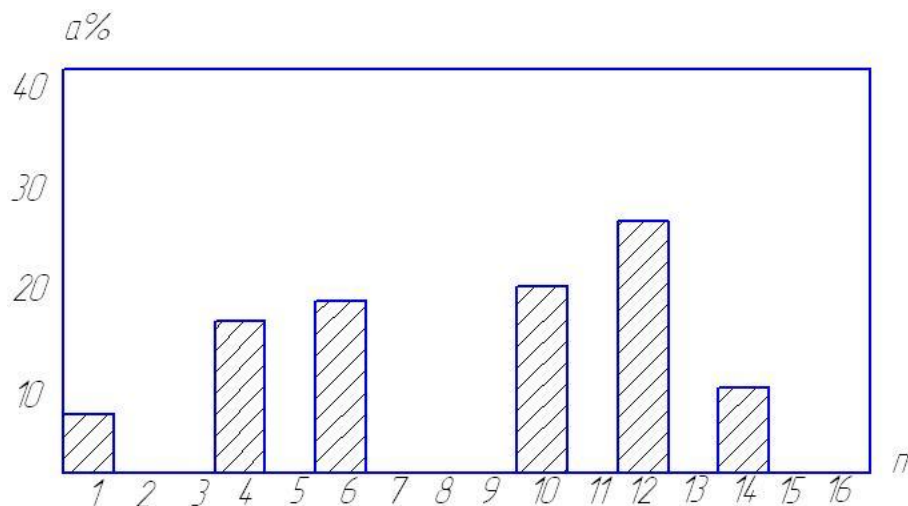


Рис. 5 – Гистограмма величин частотности числа «волн» при потере устойчивости заготовки

рисунок 6. Амплитуда указанных волн мала (не более  $(1 \div 2)h$ ), но их количество велико – до 16-28 волн, расположенных, как видно из рисунка 6а и 6б вдоль кольца. Все углубления (волны) целесообразно изготовить одновременно, одним штампом, после чего заготовку следует

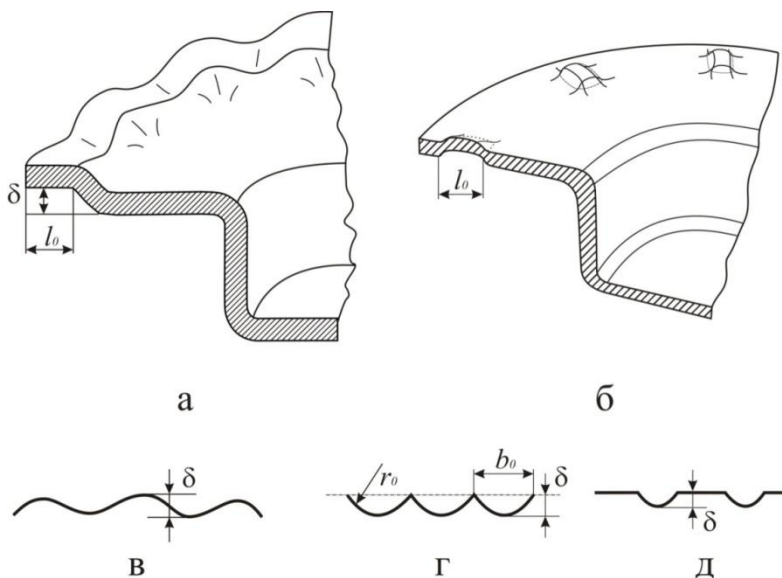


Рис. 6 – Схема нового технологического процесса вытяжки

перевернуть и подвергнуть деформации вытяжки (зазор между деформируемым листом и пуансоном должен превышать амплитуду «волн» в 1,5-2,0 раза во избежание заклинивания листа при деформации вытяжки. При этом деформация сжатия листа со складками «облегчается», (его жесткость в тангенциальном направлении уменьшена). Основная идея способа состоит в том, чтобы, заранее создать на листе (диске) большое количество «волн» малой амплитуды для предотвращения возможности появления 4-8 складок большой амплитуды. Это уменьшает жесткость деформируемой заготовки, а после

процесс вытяжки см. патент № 2491144 RU (11) С2 (рис.6). Он основан на том, что на листовой заготовке в форме диска сначала формируют ряд волн (выступов), расположенных вдоль кольцевого пояса, см.

вытяжки амплитуда может достигать 1,5мм, но это не приводит к резким изменениям общей конфигурации изделия (которые обычно имеют место при потере устойчивости), и дают возможность получать требуемое изделие высокого качества. Для многих изделий наличие на них малых «волн», впадин допустимо и не препятствует их применению. Для иллюстрации на рисунке 7 показаны образцы изделий изготовленных на заводе ОАО ЦБПР (г.Тверь) с использованием данного способа.



Рис. 7 – Образцы изделий, изготовленных с использованием нового способа.

## 5. Анализ нового способа вытяжки цилиндрических изделий из листовых заготовок

Если осуществляют деформацию растяжением тонкого листа изотропного металла, то его жесткость при упругой деформации и предел текучести, не зависят от ориентации образца, подвергаемого деформации см. рис. 8. Если параметры образца (в плане равны, т.е.,  $b = l$ , то равны и величины  $\sigma_x = \sigma_y$ , при равных силах  $P$ ), а деформация:  $\Delta l = \frac{Pl}{bhE} = \frac{\sigma l}{E}$  одинакова вдоль осей  $x$  и  $y$ , можно записать:  $\Delta l = \frac{P}{C}$  где -  $C = \frac{bhE}{l}$  жесткость данного листа при упругой деформации. Способ деформации, основан на том, чтобы до процесса вытяжки создать в листовой заготовке искусственную анизотропию с уменьшением жесткости материала в одном направлении, (относительно деформаций окружностей, т.е., - тангенциальном направлении). При растяжении участка листа силами  $P$ , расстояние между точками А и В увеличивается на

величину:  $\Delta l = \frac{3,84Pr^3}{Ebh^3}$ ; где  $E$  - модуль упругости,  $b$  - ширина листа,  $h$  - его толщина.

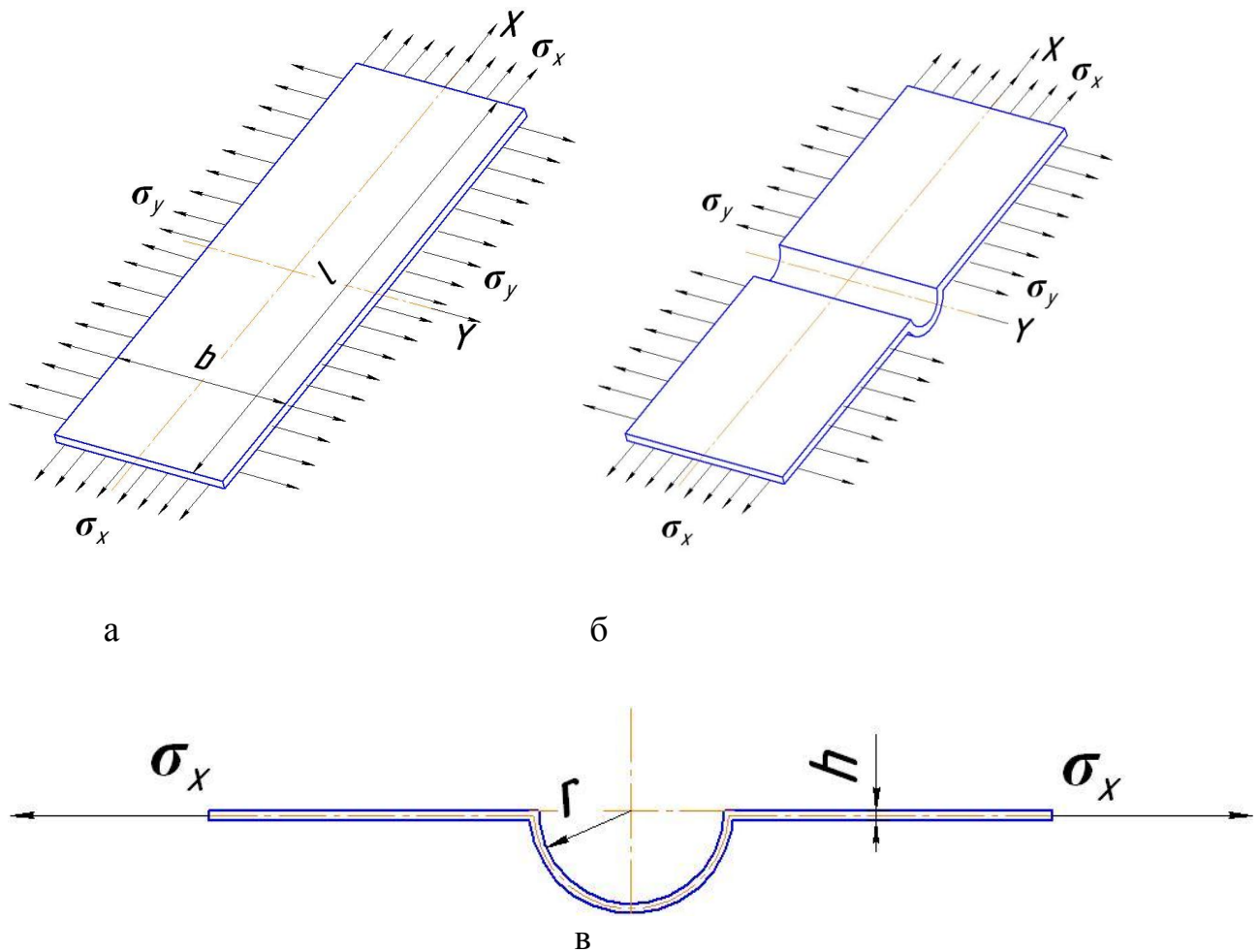


Рис. 8 – Схема деформации листов: а – изотропного металла; б – листа с искусственной анизотропией; в – углубление радиусом  $r$

Например, при  $l = 50$  мм,  $h = 1$  мм;  $r = h = 1$  мм;  $\frac{C}{C_0} = (1 - 0,04 + \frac{3,84 \cdot 1}{50 \cdot 1})^{-1} = 0,965$  и данное углубление приведет к уменьшению жесткости на 3,5%. Если выполнить на листе " $n$ " одинаковых углублений, то  $\Delta l = \frac{Pl}{Ebh} - (1 - \frac{2r}{l}n + \frac{3,84Pr^3n}{lh^2})^{-1}$  и следовательно соотношение величин жесткости составит:  $\frac{C}{C_0} = (1 - \frac{2rn}{l} + \frac{3,84nr^3}{lh^2})^{-1}$ . Если для приведенного примера выполнить на листе десять малых углублений радиусами 1 мм, то получим  $\frac{C}{C_0} = 0,73$ , т.е., реализовано уменьшение жесткости на 27%. Это создает существенную анизотропию по отношению к деформационным процессам растяжения вдоль



осей  $x$  и  $y$ . Выполнение локального углубления приводит к тому, что в сечении

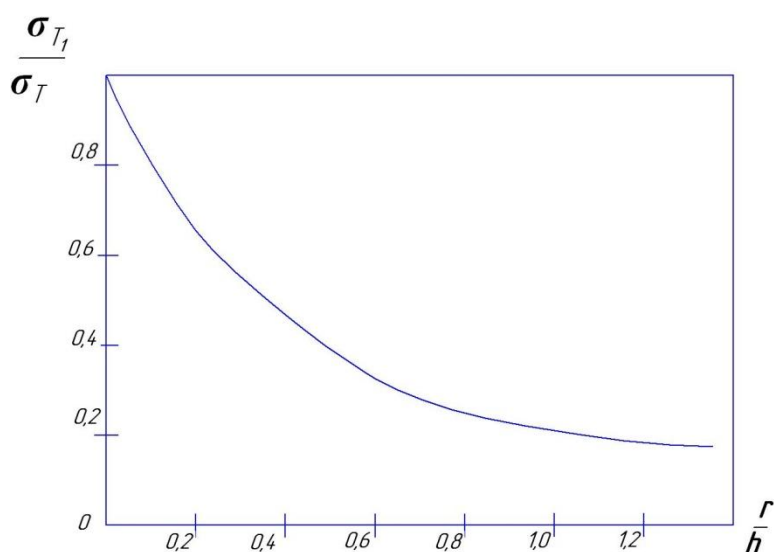


Рис. 9 – График зависимости показателя искусственной пластической анизотропии от величины создаваемых углублений в листе

будут действовать и напряжения сжатия (или растяжения), и напряжения изгиба. График функции  $\frac{\sigma_{T1}}{\sigma_T} \left( \frac{r}{h} \right)$  приведен на рис.9.

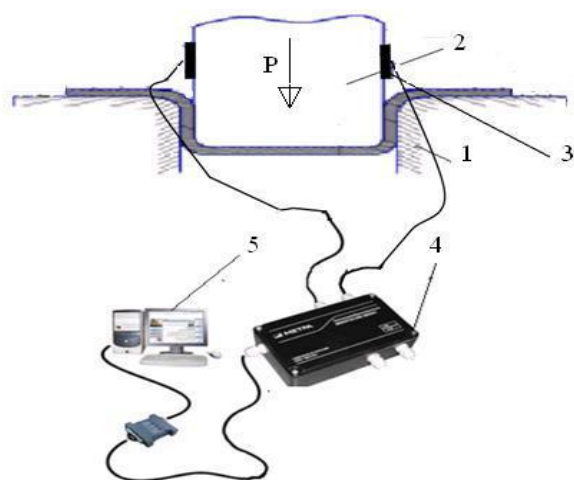
Изучено влияние углублений малой амплитуды на жесткость деформируемых листов. Показано, что углубления порядка размеров толщины листа могут существенно

уменьшить его жесткость и силу при которой начнется пластическая деформация

металла. Способ позволяет в 1,5 - 2,0 раза увеличить допустимую длину изделий, изготавливаемых вытяжкой за одну операцию.

## 6. Экспериментальные исследования энергосиловых параметров технологического процесса вытяжки тонкостенных полых деталей

Исследования проводились в условиях кузнечно-прессового цеха ОАО «2462ЦБПР». С помощью тензо и силовых датчиков тензометрической установки Zet Lab-T17 выполнили серию из 240 замеров. Единая универсальная



многофункциональная программная платформа лабораторно-промышленного исследовательского комплекса, включает (см. рис. 10) 1 -матрица, 2 – пуансон, 3 – система измерительных датчиков; 4 – усилитель – контроллер; 5 - система управления.

Рис. 10 – Измерительная схема усилий вытяжки

Для упрощения обработки измеренных величин была построена нейросетевая модель энергосиловых параметров осесимметричной деформации. Эта модель выявила локальные экстремумы, в области которых наиболее эффективны технологические процессы пластической деформации осесимметричных заготовок.

## **ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Проведен анализ различных технологических процессов изготовления вытяжкой полых цилиндрических изделий и вопросов определения напряжений и условий потери устойчивости и искажения конфигурации деформируемой заготовки.

2. На основе использования двух условий текучести: Сен-Венана, Мизеса, определены величины допустимой деформации в процессе вытяжки.

3. Приведены формулы для расчета верхних границы величин усилий деформации на основе рассмотрения кинематически допустимого поля скоростей.

Предложена методика расчета погрешностей, возможных отклонений величин усилия и параметра, характеризующего устойчивость процесса, при отклонениях всех величин, входящих в формулы, от номинальных значений. Это позволило оценить возможную погрешность расчетных величин, диапазоны их изменения.

4. Разработан новый способ получения осесимметричных изделий сложной формы, основанный на том, что на заготовке до начала деформации или после реализации части деформаций создают искусственную анизотропию за счет создания небольших углублений, ориентированных в радиальном направлении. Если число таких искусственных малых углублений, имеющих размеры порядка толщины тонких листовых заготовок: 0,5-1 мм равно 18-24, то это обеспечивает то, что процесс деформации стабилен и углубления, складки более крупных размеров не возникают.

5. Исследовано влияние искусственных углублений на процесс деформации, показано, что они существенно уменьшают жесткость

заготовки при воздействии тангенциальных напряжений сжатия.

6. Проведены экспериментальные исследования с измерением усилий вытяжки при деформации стальных заготовок толщиной  $0,5 \pm 0,03$  мм, с пределами текучести 235-250 МН/м<sup>2</sup>, проведено 240 опытов, позволивших оценить точность расчетных формул.

7. Предложенный способ реализован на предприятии ОАО «2462 ЦБПР» г. Тверь, при изготовлении 20 тысяч изделий – корпусов фильтров, с экономическим эффектом 400 тыс. руб.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Бровман, Т.В. Способ вытяжки осесимметричных заготовок с их предварительной деформацией [текст]/ Т.В. Бровман, М.Г. Васильев Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 5 С. 20-23.

2. Васильев, М.Г. Новый технологический процесс вытяжки осесимметричных заготовок [текст] / М.Г. Васильев Технология металлов. 2014. № 4. С. 10-14.

3. Brovman, T. V. New technological process of drawing [text] / T. V Brovman, M.G. Vasiljev Journal Of Harmonized Research (JOHR). 2014. № 2(1) P. 201-207.

4. Васильев М.Г. Новый технологический процесс вытяжки осесимметричных заготовок [текст] / V международная конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» г. Москва 2013 г. С.233.

5. Пат. № 2496613 RU (13) С2 Российская Федерация, В23С5/26 (2006.01) Дисковая фреза / Т.В. Бровман, В.С. Ващенко, М.Г. Васильев, С.С. Ухабов, заявл. 12.05.11; опубл. 27.10.13 Бюл. № 30.

6. Пат. № 2491144 RU (11) С2 Российская федерация, В21D22/20 (2006.01) Способ изготовления полых цилиндрических изделий/ Т.В. Бровман, А.Б. Горященко, М.Г. Васильев, С.С. Ухабов, заявл. 08.06.2011; опубл. 27.08.2013 Бюл. 24.