

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова
Российской академии наук
(ИМЕТ РАН)

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
Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант д.т.н. Юсупов Владимир Сабитович

Москва -2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ	8
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	8
1.1. Характеристика процессов обработки давлением.....	8
1.2. Современные технологические процессы изготовления тонкостенных цилиндрических изделий	18
1.3. Современные процессы локальной деформации полых заготовок	30
1.4. Повышение точности размеров заготовок при деформации упругопластического изгиба	37
1.5. Особенности нестационарных процессов пластической деформации	56
ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ.....	62
РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ	62
В ПРОЦЕССАХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	62
2.1. Применение кинематически допустимых полей скоростей для определения усилий деформации	62
2.2. Современные методы расчета точности заготовок в процессах обработки металлов давлением.....	74
ГЛАВА 3. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ	87
3.1. Определение напряжений при вытяжке	87
3.2. Разработка методики расчета усилий при осесимметричной деформации листовых заготовок	95

3.3.Определение параметров устойчивости и разработка новой технологии вытягивания цилиндрических заготовок	99
3.4. Новый процесс вытяжки цилиндрических втулок и его применение.....	109
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ....	119
И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВИЗНЫ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ	119
4.1.Формулы для расчета возможных	119
колебаний кривизны деформируемых заготовок при изгибе.....	119
4.2 Определение точности кривизны.....	137
заготовок, изготавливаемых деформацией изгиба.....	137
4.3. Особенности процесса деформации при подгибке в штампах кромок кольцевых заготовок	147
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗГИБА ЗАГОТОВОК	159
ГЛАВА 6. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК.....	172
6.1. Усовершенствование методов расчета усилий при локальной деформации заготовок.....	172
6.2. Экспериментальное исследование процесса локальной деформации	186
6.3. Разработка новой конструкции машины для локальной деформации криволинейных заготовок.....	194
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	203
Приложение 1.....	221
Приложение 2.....	222

ВВЕДЕНИЕ

Развитие металлургической промышленности за последние 30 лет позволило значительно усовершенствовать процессы обработки давлением. На машиностроительных заводах широко используют процессы обработки металлов и сплавов: ковка, штамповка, правка, волочение и прокатка и другие.

Технологические процессы: изгиб заготовок, правка, вальцовка позволяют получать из листов или сортового металла криволинейные изделия, в частности, трубы, потребность в которых увеличивается.

Проектирование технологических режимов обработки металлов давлением и оборудования для реализации новых прогрессивных процессов производят с использованием современных методов теории пластичности. Важно определить с точностью, достаточной для разработки технологии и оборудования, усилия деформации, крутящие моменты на валах приводов, мощности машин, реализующих процессы обработки давлением.

Следует при этом иметь в виду, что сортамент металлов и сплавов, используемых в процессах обработки металлов давлением, все время расширяется. Для материалов, часто данных об их пределах текучести, т.е. о величинах сопротивления пластической деформации (СПД) совершенно недостаточно.

В последние годы все чаще применяют стали IF, т.е. стали с низким количеством примесей, к тому же связанных ниобием Interstitial Free Steels. Для них экспериментальных данных о величинах пределов текучести недостаточно. Также находят применение стали «сверхнизкоуглеродистые» с эффектом ВН (Bake Hardening effect). Особенностью сталей ВН является то, что они существенно упрочняются при нагреве до температур в интервале: 150-200⁰С, например, при сушке лакокрасочных покрытий (после штамповки и окраски). При вытяжке заготовок из этих

сталей величины СПД относительно низкие, что облегчает их изготовление, а после нагрева и упрочнения их прочность в условиях эксплуатации удастся значительно увеличить.

Создание в 60-е годы прошлого века кулачковых пластометров позволило получить значительное количество данных по величинам СПД для многих металлов и сплавов, о механических свойствах металлов и сплавов, как при низких, так и при высоких температурах, в широком диапазоне используемых скоростей деформации.

Значительные успехи в развитии теории пластичности и в создании новых способов экспериментальных исследований, (особенно пластометров), способствовало развитию технологии процессов обработки давлением.

Однако задачи этой теории не сводятся только к определению с достаточной точностью силовых факторов, т.е. усилий, необходимых для реализации процесса. Необходимо, обеспечить достаточно высокую точность изготавливаемых изделий.

Очевидно, что агрегат, например, пресс, вальцовочная машина или прокатный стан, обеспечивающий высокую производительность, но не обеспечивающий высокую точность получаемых изделий, нельзя признать удовлетворительным. Его эксплуатация приведет к значительным потерям металла в виде обрезки, отходов, стружки при последующей механической обработке, увеличению расхода энергии. Поэтому задачи увеличения точности изделий, изготавливаемых в процессах обработки давлением, приобретают все большее значение.

Следует отметить все возрастающие требования к качеству и точности листовой продукции. Так, например, отклонения от плоскостности стальных листов шириной до 1000 мм допускаются по стандарту США ASTM -568-92: 10мм, (если предел текучести менее $310 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$), и 20мм, (если предел текучести $310-345 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$), (эти требования стандарта США относятся к

листам толщинами до 1,0мм). Аналогичные требования стандарта Германии DIN1623.1-83 определены величинами 12мм – при нормальной точности листов и 5 мм – для листов высокой точности.

Стандарт Японии JISG3141-90 предусматривает для листов шириной до 1000 мм: 8мм для отклонений по кромке листа и 6 мм для отклонений в его центре.

Стандарт России ГОСТ 19904-90 предусматривает для листов отклонения 12мм при «нормальной точности», 10мм при «улучшенной точности» 8мм при «высокой точности» и 4 мм при «особо высокой точности».

Имеет место повышение требований в отношении допусков на толщины стальных листов холодной прокатки. Так для листов толщиной до 1 мм стандарт США ASTM – 568-92 предусматривает для листов шириной до 1000 мм предельные отклонения 0,05мм (при толщине до 0,40мм) и 0,075 мм, (при толщине 0,40-1,00мм).

Стандартом Германии DIN 16231-83 предусмотрены отклонения 0,04мм, (при толщине до 0,50мм) и 0,05мм, (при толщине до 0,60мм).

Стандарт Японии JISG 3141-90 предусматривает отклонения до 0,03 мм, если толщина листа до 0,25 мм и 0,04 мм, при толщине 0,25-0,40 мм.

Стандартом России ГОСТ 19904-90 оговаривается при ширине листов до 1000мм три группы точности: группа В с отклонением 0,02 мм, (при толщине 0,35-0,40 мм); группы А: 0,03 мм, (при таких же толщинах), и группы Б: 0,04мм.

Видна тенденция, согласно требованиям стандартов различных стран, к повышению требований в отношении точности изделий, изготавливаемых при обработке давлением.

Между тем, в процессах обработки давлением часто возникают искажения формы заготовок.

Во-первых, все параметры, определяющие процесс, такие, как размеры заготовок, величины характеристик их механических свойств (предел текучести, модуль упругости) известны лишь с определенными отклонениями, они не являются точными числами, всегда можно определить их только, как некоторые интервалы. Это определяет и колебания таких величин, как усилия деформации, размеры полученного изделия (его толщина, кривизна).

Во-вторых, настройка инструмента, например, установка межвалкового зазора, или создание усилия для изгиба заготовки также осуществляется с некоторой степенью неопределенности, что естественно, приводит к неопределенности, разбросу размеров изделия.

В-третьих, в процессах деформации возможны случаи потери устойчивости, например, при изготовлении цилиндрических стаканов вытяжкой потеря устойчивости может привести к образованию складок и снижению качественных показателей металлопродукции.

В процессах изгиба возможен при определенных величинах усилий и прогибов, процесс резкого возрастания колебаний величины кривизны и погрешностей этого важного параметра. Иногда затруднительно бывает обеспечить точность размеров заготовок при их локальной деформации, когда пластическую деформацию реализуют только в малой части объема заготовки. Между тем, процессы локальной деформации, т.е. такие, в которых пластическая деформация реализуется только в части объема деформируемого тела, получают все более широкое применение.

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.

ГЛАВА 1. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

1.1. Характеристика процессов обработки давлением

Процессы обработки давлением можно разделить на стационарные и нестационарные, причем в обоих видах процессов характерным является повышение требований к качеству продукции.

Характеристика требований к технологическим режимам и тенденций к их усовершенствованию приведена в работах [1-7].

В стационарных процессах, таких как прокатка или волочение форма зоны деформации сохраняется в течение определенного времени, при этом в зону деформации все время поступают новые объемы деформируемого металла. Это же относится к деформации изгиба на некоторых роликотправильных машинах. Но находят широкое применение нестационарные процессы, такие как осадка, вальцовка-изгиб заготовок, вытяжка из листа полых стаканов, локальная деформация концевых участков труб и т.д., в которых в процессе деформации существенно изменяются и конфигурация деформируемого изделия, и напряженное состояние металла этого изделия [5-12].

Конечно, и в стационарных процессах, например, при прокатке, условия деформации изменяются за счет биений валков, колебаний температуры металла, начальной разнотолщинности, напряжений и других факторов, оценка таких изменений имеет большое значение.

Следует указать на различия в процессах пластической деформации при обработке давлением. В некоторых из них пластическую деформацию осуществляют по всему объему заготовки, а в ряде процессов пластическую деформацию реализуют только в части объема заготовки.

Так при ковке и в ряде случаев при штамповке пластическая деформация происходит по всему объему деформируемого тела, (хотя, конечно, напряженное состояние изменяется по объему и обычно является неоднородным).

При прокатке в большинстве случаев пластическая деформация также реализуется по всему объему заготовки, хотя не одновременно (но последовательно по длине проката). Но имеется важный класс процессов обработки давлением, в которых пластическая деформация реализуется только в части объема деформируемого тела.

В ряде случаев это является целью процесса обработки металлов давлением, как например, деформация концевых участков труб. Это определяется целью процесса деформации, например, если нам необходимо получать трубы переменной толщины с утолщениями вблизи концов труб. В таких задачах локальная деформация является целью процесса, - именно ее необходимо реализовать. 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 реализации такого процесса следует обеспечить локальный нагрев деформируемых заготовок, (очевидно, что имеет смысл нагревать только ту часть металла, которая подвергается пластической деформации).

В процессе такой деформации возможно воздействие факторов, нарушающих точность размеров изделия и ухудшение условий деформации.

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 $\pm(0,10\dots 0,15)\sigma_T$.

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. НИИПТМАШ для ОАО «Укруглегеология» разработал комплекс оборудования для обработки труб диаметрами до 62–64 мм из углеродистых сталей и сталей типа 36Г2С. Из-за малой толщины стенок, заготовки оказываются переохлажденными, и если их температура снижается менее 1050°C , то количество некачественных деталей достигает 5–7%.

На рис. 1.1 показана схема деформации заготовок, носящая характер локальной деформации.

На рис. 1.1а показано сечение трубы с начальным диаметром d_0 , (это ее наружный диаметр) после деформации. Концевой участок трубы деформирован так, что его толщина выше, чем остальной трубы.

Диаметр d_0 увеличен на длине l до d_1 (либо за счет увеличения наружного диаметра, либо за счет уменьшения внутреннего диаметра, рис. 1.1а). Такие трубы часто используют при строительстве шахт. Но часто возникает потребность в криволинейных трубах с утолщениями, рис. 1.1б. Изготовление криволинейных труб (обычно с осями в виде окружностей), вызывает большие затруднения. Решению этой задачи в данной работе посвящена отдельная глава.

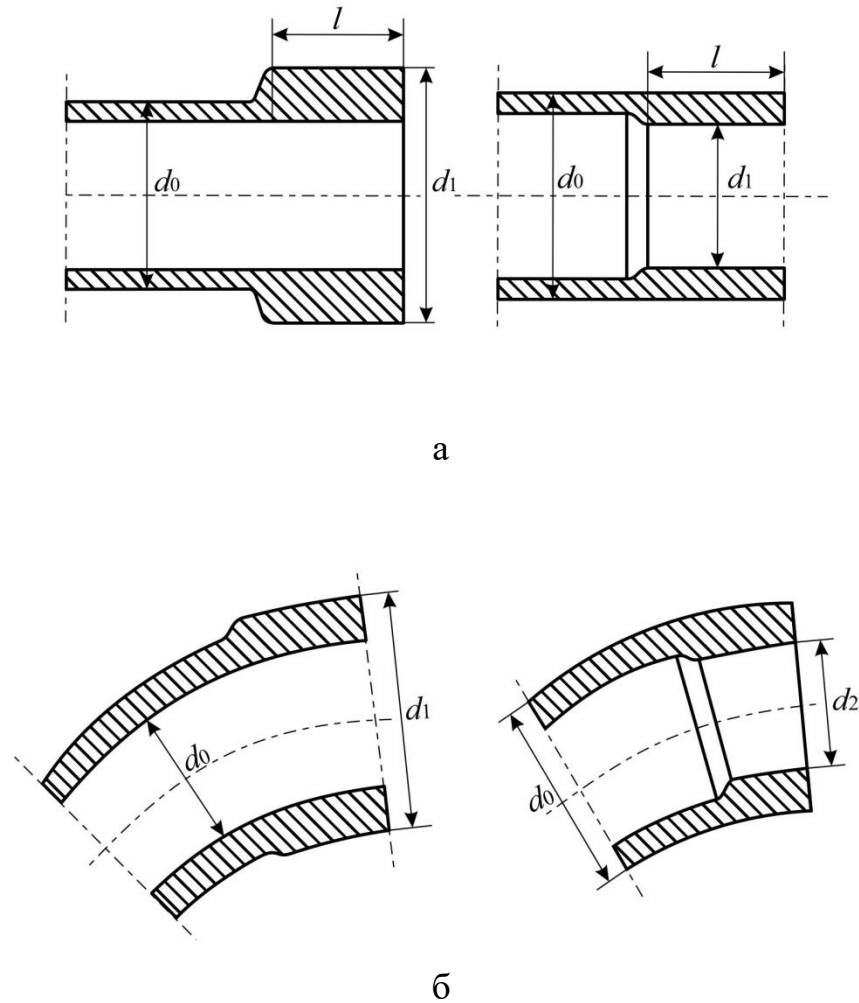


Рисунок 1.1. - Деформация концевых участков заготовок переменного сечения: а – прямолинейных; б – криволинейных

Но в таких процессах, как например, деформация вытяжки тонкостенного стакана, процесс деформации иной [9-11].

На рис. 1.2 показана схема вытяжки стакана из тонкой заготовки без утонения, имеющей до деформации форму диска. Давление пуансона P обеспечивает процесс деформации вытяжки цилиндрической заготовки. Как видно из рис. 1.2 эта деформация также является локальной, поскольку на значительной части ее объема, а именно «днища», пластической деформации не происходит.

Если мы хотим из заготовки в форме диска диаметром d_0 получить цилиндрический стакан диаметром d_1 и длиной l , то приближенно можно

записать условие $l = \frac{d_0 - d_1}{2}$. Очевидно, что пластическая деформация неизбежна в части заготовки, имеющей длину l объемом $\pi h l d_1$, а часть ее, а именно «дно стакана» объемом $\sim \frac{\pi d_1^2}{4} h$ останется жесткой и будет, как жесткое тело, перемещаться в направлении действия силы P .

Отношение доли объема, в котором имеет место пластическая деформация, к объему, в котором материал остается жестким, (или испытывает только упругую деформацию) равно $\frac{\pi d_1 l h}{0,25 \pi d_1^2 h} = \frac{4l}{d_1}$.

Чем длиннее стакан, тем больше зона пластической деформации, например при $l = d_1$ это отношение равно 4, т.е. доля объема материала, который остается жестким, равна 25% объема всей заготовки, (если предположить, что она полностью по всей длине испытывает деформацию вытяжки).

Ниже будет показано, что процесс вытяжки является существенно нестационарным.

По мере деформации степень деформации кольцевого участка заготовки все время возрастает и это приводит к тому, что обеспечивать точность размеров заготовки, а, следовательно, и ее качество, становится все более затруднительным. Все возрастающая деформация сжатия создает условия для потери устойчивости деформируемой заготовки и искажения ее конфигурации.

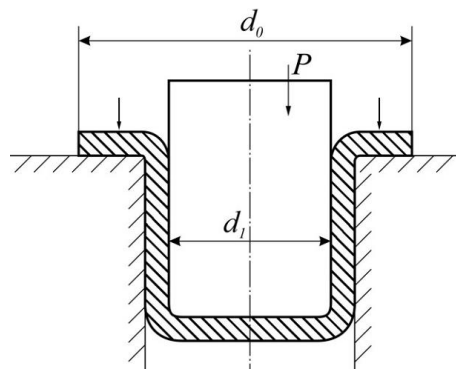


Рисунок 1.2 – Схема деформации при вытяжке

Речь идет уже не о воздействии случайных факторов, нарушающих точность размеров изделия, а о закономерном ухудшении условий деформации.

К чему это может привести, показано на рис.1.3, происходит искажение формы заготовки, она становится волнистой. Отклонения настолько велики, что приводят уже к неисправимым дефектам [16].



Рисунок 1.3–Искажение формы заготовки в процессе деформации

Ниже будет показано, что при реализации данного процесса в ряде случаев можно изменить процесс деформации таким образом, чтобы повысить точность размеров заготовок за счет введения в технологический процесс дополнительной локальной деформации.

Точность размеров заготовок, получаемых в процессе обработки давлением, зависит от многих факторов.

Во-первых, размеры заготовок до начала деформации никогда не заданы точно. И литые заготовки, и прокат, поковки имеют определенные области (диапазоны), в которых возможны колебания размеров, т.е. их нельзя определить, как точные числа.

Во-вторых, характеристики механических свойств, в первую очередь предел текучести, также являются величинами, известными, лишь с некоторой степенью неопределенности.

В таких процессах, как изгиб, при котором в заготовке сохраняются значительные зоны упругой деформации, оказывают влияние колебания величины модуля упругости. Возможны изменения также характеристик упрочнения, зависимости механических свойств от скорости деформации, другие факторы (влияние химического состава металла, колебания содержания легирующих элементов и условий термической обработки).

К третьей группе факторов, создающих нестабильность размеров изделий, получаемых в процессах обработки давлением, следует отнести погрешности установки заготовок, например, при расположении листа под пуансоном для дальнейшей вытяжки, или полый заготовки для деформации ее концевой участка.

К четвертой группе факторов, способствующих нестабильности процессов относятся неизбежные изменения условий их реализации. При нагреве причиной может быть нестабильность температуры нагрева заготовок. При холодной деформации со смазкой могут возникать колебания величины расхода, (количества и качества), смазки, что приводит к колебаниям коэффициента трения. Влияние трения на процессы деформации может быть весьма значительным. Всегда ценную информацию дают экспериментальные исследования процессов деформации металлов.

В монографии С.Э. Хайкина указано [26], «в сущности при измерении мы никогда не получаем какого-либо определенного значения физической величины, а лишь пределы, между которыми эта величина заключена». Это соответствует также реальным условиям деформации металлов. Дело не только в неизбежных «погрешностях эксперимента».

Конечно, погрешности измерения размеров заготовок, температур, усилий и т.д. всегда имеют место.

Различия между процессами, в которых пластическая деформация реализуется во всем объеме деформируемого тела и такими, в которых пластическая деформация происходит только в части объема деформируемых заготовок, могут быть весьма значительными.

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).

Например, при изгибе заготовки на двух опорах усилием P , рис.1.4, 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 $\sigma = \frac{6M(x)}{bh^2} = \frac{3Px}{bh^2}$ для заготовки прямоугольного сечения $b \times h$. При $\sigma = \sigma_T$ – начнется пластическая деформация (σ_T – предел текучести материала заготовки), отсюда следует, что расстояние l_1 определено уравнением $\frac{3Pl_1}{bh^2} = \sigma_T$ или

$$l_1 = \frac{\sigma_T bh^2}{3P} \quad (1.1).$$

Предельное значение момента составляет $M_{max} = 0,25\sigma_T bh^2$.

При изгибе балки из идеально пластического металла существует предельное усилие, при котором пластическая деформация распространяется по всему сечению, (и дальнейшее увеличение изгибающего момента невозможно). Эта величина равна для заготовки прямоугольного сечения $b \times h$

$$M_{max} = 0,25\sigma_T bh^2$$

и подставив эту величину в формулу (1.1), получим $l_1 = \frac{l}{3}$.

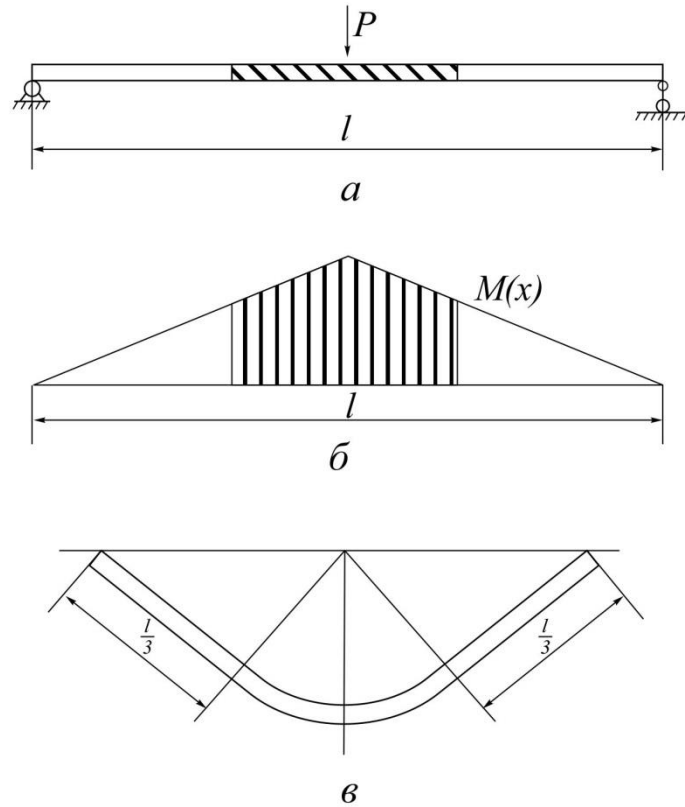


Рисунок 1.4 – Схема изгиба заготовки сосредоточенной силой и эпюра изгибающих моментов: а – схема нагрузки при изгибе; б – эпюра изгибающего момента $M(x)$; в – конфигурация заготовки после деформации

Следовательно, при получении заготовок деформацией изгиба ее участки вблизи опор длинами $\frac{l}{3}$ остаются упругими и после разгрузки они останутся прямолинейными (или приобретут начальную кривизну, которую имели до деформации), рис.1.4.

Изгиб прямолинейной заготовки – это процесс, в котором даже при максимальной нагрузке $\frac{2}{3}$ длины заготовки останутся прямолинейными, рис.1.4. 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 (при изгибе по схеме рис.1.4) можно только на $\frac{1}{3}$ длины заготовки.

Деформацию может ограничить и потеря устойчивости заготовок. Например, при вытяжке как уже указано, может быть нарушена плоскостность листа, рис.1.5. Из-за потери устойчивости при деформации вытяжки заготовок типа «стаканов» их длина ограничена. Ниже приведены данные Л. Шофмана и других авторов, иллюстрирующие увеличение в процессе вытяжки радиальных растягивающих напряжений и увеличение по модулю тангенциальных напряжений сжатия, что приводит к потере устойчивости и искажению формы деформируемых стаканов, на рис.1.5а,б.

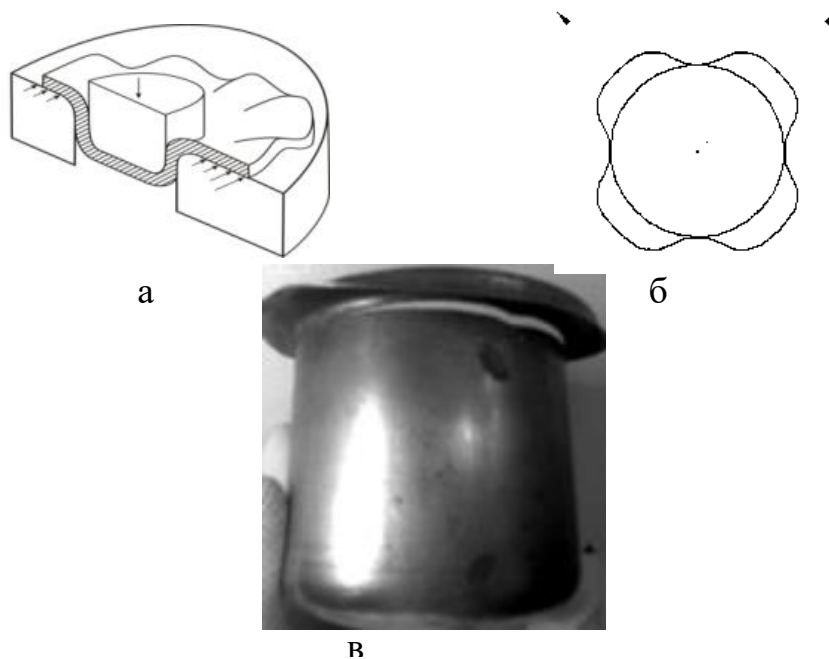


Рисунок 1.5- Схемы: а - деформации вытяжки с образованием складок; б - образование фестонов; в - фотографии деформируемого изделия диаметром 110 мм, высотой 92 мм из стали 08Ю с кольцевой трещиной

Применением локальной дополнительной деформации можно повысить устойчивость деформируемых заготовок и повысить их качество. При завышенных степенях деформации может возникнуть кольцевая трещина, рис.1.5в.

1.2.Современные технологические процессы изготовления тонкостенных цилиндрических изделий

Изготовление цилиндрических изделий различных размеров из листовых заготовок часто используют для корпусов различных фильтров, коробок противогозов и других изделий из сталей и сплавов цветных металлов, например, латуней [6-12].

При схеме деформации, приведенной на рис.1.2 анизотропные металлы могут образовывать выступы по краям, т.н. «фестоны», количество которых может быть равным 4,6 или более, рис.1.5в.

Процесс образования фестонов изучил Р. Хилл [27]. Эти вопросы исследовали ученые Тульского политехнического института С.П. Яковлев, И.П. Ренне, Е.А. Закуренов и другие [28, 29, 31,], (а также[117]).

Ф. Блазик с соавторами исследовал деформацию вытяжки тонких листов в матрицах, имеющих форму поверхности тора или кривой-трактрисы (рис.1.6), где показаны оба этих варианта[21].

На основании исследований, выполненных в техническом университете в Кошице (Чехия), авторы [21] пришли к выводу, что лучше выполнить штамп не в форме плоскости с отверстием, и не в форме круга (или фасок круглой формы в плоской матрице), а в виде матрицы, выполненной в форме трактрисы, что обеспечит опирание краев заготовки на матрицу в течение процесса вытяжки. Но при возникновении высоких напряжений сжатия, опоры не смогут предотвратить возникновения «волнистости», т.е. потери устойчивости листа.

Следует отметить, что ранее, в 1989 г. использование матрицы в форме кривой – трактрисы было предложено в СССР [33].

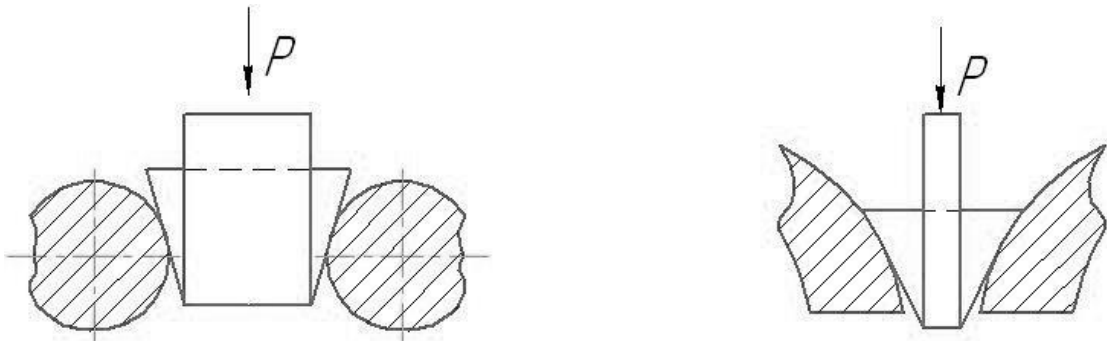


Рисунок 1.6 – Схема деформации вытяжки в криволинейных матрицах: а – в матрице с поверхностью в виде тора; б – с образующей в форме трактрисы [21]

В изобретении [34] предложен технологический процесс для изготовления вытяжкой цилиндрических изделий из плоских тонколистовых металлических заготовок. Способ включает прижим заготовки по фланцу к жесткой матрице и вытяжку профилированным пуансоном с пробивкой отверстия, его отбортовкой и окончательным оформлением детали. Вытяжку проводят в два этапа. На первом этапе формируют дно заготовки с прижимом по фланцу заготовки к жесткой матрице. Во втором этапе осуществляют окончательную формовку детали по жесткому вкладышу в виде матрицы, обеспечивающей (при эластичном профилированном пуансоне) деформацию заготовки. Профилированный пуансон выполнен из эластичного материала.

В работе [35] описан способ листовой штамповки для производства цилиндрических тонкостенных полых изделий ответственного назначения. Сущность изобретения заключается в том, что из некруглой заготовки получают круг, после чего производят ее предварительную, а затем и окончательную вытяжку.

Известны штампы, набранные из пластин, позволяющие изменять форму деформирующих заготовок.

В конструкции вытяжного штампа [36], рис.1.7, с целью самоустановки зазора между плоскостью матрицы 5 и прижима 8 в

зависимости от толщины заготовки 6, верхняя плита 2 соединена с клином 11 с возможностью осевого перемещения относительно него и связана с ним посредством втулки, штока, закрепленных на клине 9. Крепление к верхней плите осуществлено подвижным соединением, состоящим из штока 12, подпружиненной муфты 13, гильзы 14 и шариков 15. Шарики гильзы входят в круговой паз штока 12 после заклинивания прижима отжимают муфту 13.

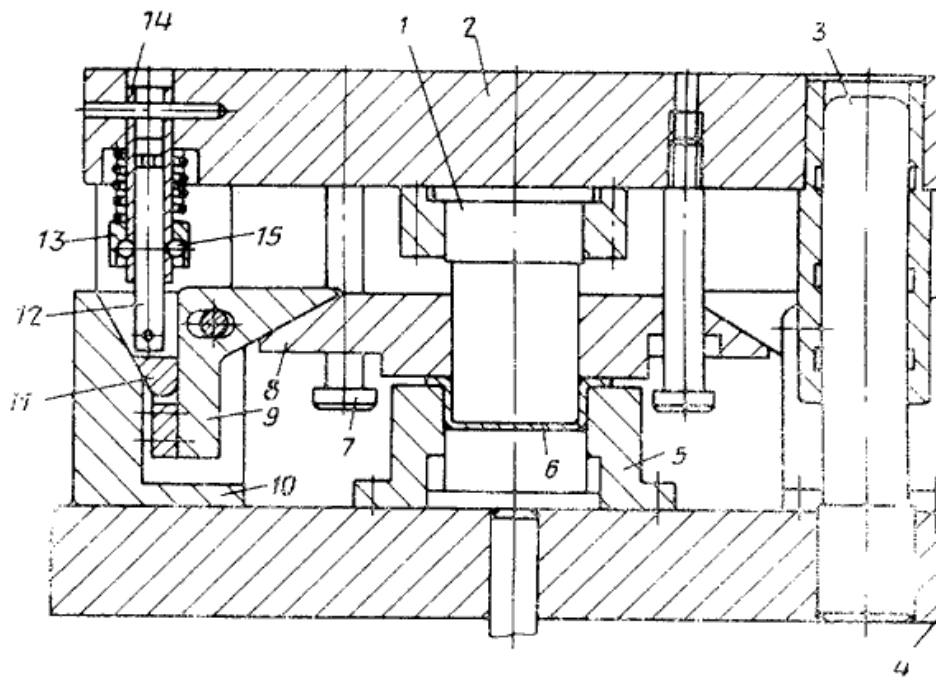


Рисунок 1.7 – Штамп вытяжной по авторскому свидетельству 454073

В работе [37] представлен способ получения глубоких тонкостенных цилиндрических изделий из многогранных заготовок, включающий операции отрезки или вырубки из полосы или ленты многогранной заготовки с основанием в виде правильного многоугольника и последующую многопереходную комбинированную вытяжку, при которой заключительную операцию осуществляют пуансоном с цилиндрической боковой поверхностью, отличающийся тем, что все операции вытяжки, за исключением последней, осуществляют пуансонами, на боковой цилиндрической поверхности которых, выполнены лыски по числу боковых граней заготовки глубиной, равной 0,1 – 0,25 величины зазора

между матрицей и цилиндрической поверхностью пуансона. Причем на первой операции вытяжки заготовку относительно пуансона ориентируют так, чтобы максимальный зазор между лысками пуансона и матрицей имел место в направлениях от оси заготовки к ребрам ее боковых граней, а на последующих операциях вытяжки полученный полуфабрикат с "коронками" ориентируют так, чтобы упомянутый максимальный зазор имел место в направлениях от оси полуфабриката к вершинам его "коронок".

В работе [28] изложены опыты по вытяжке цилиндрических заготовок из ленты, полученной холодной прокаткой (из стали 08кп) толщиной 1,15-1,55 мм. Однако следует иметь в виду, что анизотропия не является единственной причиной нарушения формы деформируемой ленты. И для изотропных материалов возникновение напряжений при течении к оси заготовки ее краевых участков вызывает большие напряжения сжатия в тангенциальном направлении, что приводит к нарушению устойчивости плоской формы листа и образованию складок. Также необходимо отметить, что изготовление профильной заготовки, форма которой показана на рис.1.8, усложнит технологический процесс.

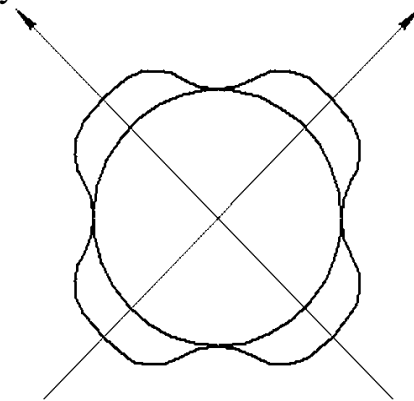


Рисунок 1.8 – Схема профильной заготовки, предложенной для устранения фестонов

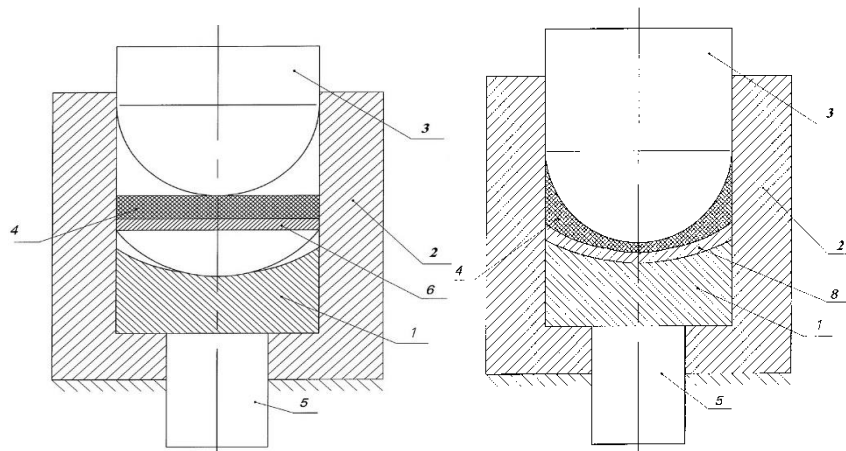
Для изготовления огнетушителей и фильтров, пластин для теплообменников, вентиляционных систем, систем водостоков, деталей экструдеров широко применяемых при эксплуатации и обслуживании агрегатов и узлов машин российская «Индустриальные Системы & Решения» и финская «Päätytuote Oy» компании использует процессы листовой штамповки (рис.1.9).



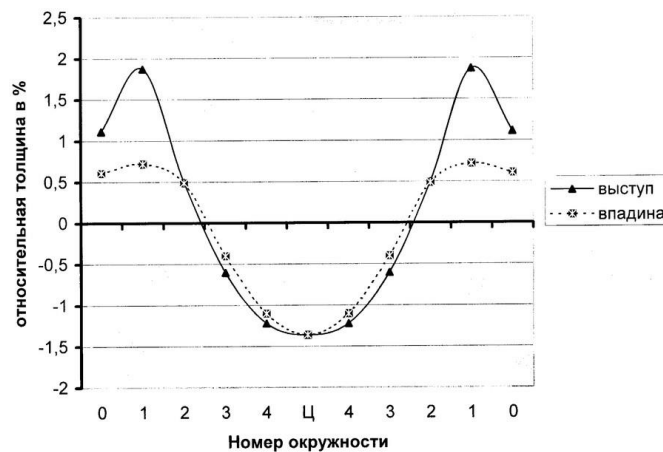
Рисунок 1.9 – Примеры деталей, полученные глубокой вытяжкой

В работе [38] предложен способ изготовления облицовок сферической формы, показанной на рис.1.10. На матрицу 1 в контейнере 2 с внутренним диаметром $100^{+0,5}$ мм устанавливают листовую заготовку 6 диаметром 100мм, толщиной 3 мм, выполненную из стали 08кп, рис.1.10а. Резиновая подушка 4 толщину 18мм сдавливается толкателем 3 удельным давлением $4 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$. Изменение толщин штампуемых заготовок показано на

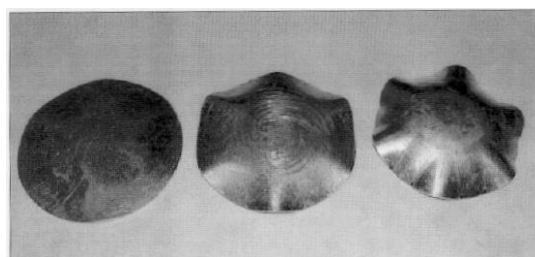
графике 1.10б, минимальное утонение в купольной части достигает 1,5%, утолщение по выступам - 2%, по впадинам -0,8%.



а



б



в

Рисунок 1.10 – Схема реализации способа изготовления облицовок сферической формы согласно изобретению по патенту РФ № 2261770: а - 1-матрица, 2 – контейнер; 3 - сферический толкатель; 4 – многослойная резиновая подушка; 5 – выталкиватель; б – график изменения относительной толщины заготовки; в – фотографии заготовки по трем переходам

В работе [39] описан комбинированный способ изготовления оболочек с локальными утолщениями ротационным выдавливанием вращающейся заготовки раскатными роликами. Предварительной вытяжкой из листа изготавливают заготовку с внутренней поверхностью, соответствующей внутреннему контуру утоненной части оболочки, затем ротационным выдавливанием полученную заготовку локально обжимают, а заданную толщину стенки получают путем последующей механической обработки внешней поверхности оболочки, величину обжатия определяют по зависимости, учитывающей изменение толщины участка оболочки.

В работах ученых Тульского Политехнического института [29,31,37] приведены данные исследований плоского напряженного состояния анизотропных материалов и влияния напряженного состояния на предельную степень вытяжки.

В работе [32] изучена деформация полых стаканов из сплава АМгб с учетом реальной анизотропии металла, указано, что максимальное усилие при деформации анизотропной заготовки меньше, чем у изотропной, причем различия по этим данным могут достигать 100%. Ряд способов предложен в работах [49,50].

Известны способы с использованием нажимных приспособлений, например, при штамповке деталей сферической или тороидальной формы. В устройстве для штамповки деталей из листовых заготовок матрицу часто выполняют с входным конусом. При этом обеспечивается повышение точности и качества изготавливаемых деталей.

В работе [44] предложен способ получения осесимметричных деталей с применением импульсной вытяжки (в том числе деталей коробчатой формы). Формообразование заготовки осуществляют путем воздействия на нее импульсами нагружения, создаваемыми электрическим разрядом.

Во всех устройствах процесс вытяжки связан с такой схемой реализации пластической деформации, при которой происходит течение металла в радиальном направлении.

Если происходит радиальное течение металла к оси z , рис.1.11а, то, следовательно, реализуется деформация сжатия заготовки 1 в тангенциальном направлении. Радиус любой окружности на опоре 2 уменьшается (от R_0 до R_1 , рис.1.11а). При этом вдоль оси «г» - в радиальном направлении действуют растягивающие напряжения. Обозначив, как обычно, напряжения $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{rz}$ можно сделать вывод, что $\sigma_r > 0$, а $\sigma_\theta < 0$, в то время как касательное напряжение τ_{rz} для деформации тонких заготовок часто принимают равными нулю.

При $R_1 < R_0$, (рис.1.11а), действуют растягивающие напряжения $\sigma_z > 0$, создаваемые пуансоном 3. Но данное осесимметричное напряженное состояние с появлением напряжений сжатия может привести к потере устойчивости деформируемой заготовки и искажению ее формы, (в частности, нарушению ее плоскостности). Поэтому часто реализуют деформацию вытяжки с прижимом, предотвращая ее выпучивание при потере устойчивости.

Взаимодействие заготовки с прижимом в начальной и последующих стадиях вытяжки, течение металла в зоне фланцев заготовки и возможности развития в них фестонов проанализированы в работе Л.А.Толоконникова, В.В.Шевелева и С.П.Яковлева [19].

Развитие неравномерной деформации и формирование фестонов часто связано с возникновением складок (волнистости), но складки возникают и на изотропном материале, поскольку их основной причиной является развитие напряжений сжатия, приводящих к потере устойчивости.

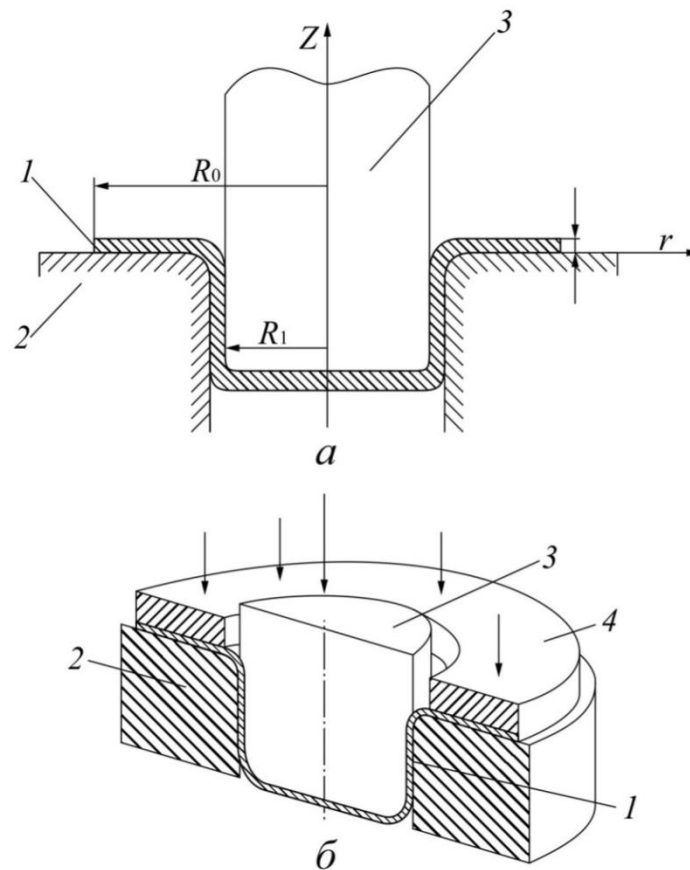


Рисунок 1.11 – Схема деформации при вытяжке

Появление складок нарушает нормальный ход процесса вытяжки и часто приводит к дефектам.

Деформацию без прижима используют при вытяжке заготовок из более толстых листов, а деформацию с прижимом при деформации тонких листов, более склонных к потере устойчивости.

На рис. 1.12 показана схема деформации тонкого листа при потере его устойчивости и образовании складок.

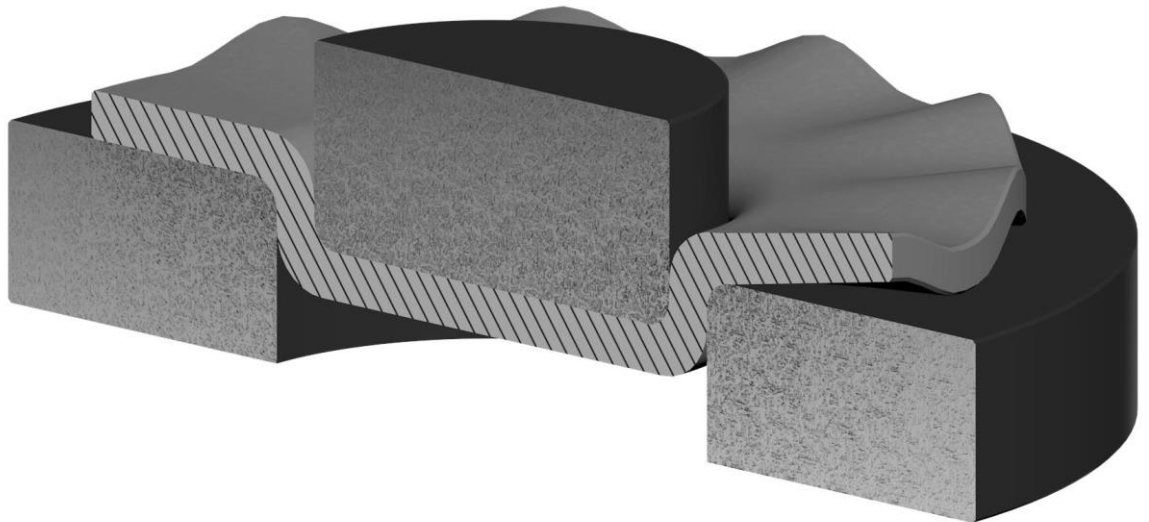


Рисунок 1.12- Схема деформации вытяжки с потерей устойчивости заготовки и образованием складок

Часто использование вытяжки с прижимом (как показано на рис. 1.11), решая одну проблему, создает новую. Дело в том, что при деформации вытяжки с прижимом плоских участков заготовок к матрице неизбежно возникновение сил трения, что значительно увеличивает растягивающие напряжения σ_r и может привести к появлению кольцевых трещин. Образец с такой трещиной показан на рисунке 1.5в. Развитие таких трещин приводит к неисправимым дефектам.

Иногда используют нагрев периферийных (вблизи радиуса R_0 , рис. 1.11) участков заготовки. Д. Шокер провел ряд исследований в Венском технологическом университете (Австрия) и пришел к выводу, что краевые участки заготовки следует нагревать, используя для этого лазеры [40]. Исследования показали, что при нагреве краев заготовки до 1200°C можно уменьшить усилия деформации в 4-5 раз (по сравнению с деформацией при 20°C). Однако реализация такого процесса связана со значительным увеличением расхода энергии. Поскольку процесс вытяжки часто используют именно для тонких листовых заготовок, которые очень быстро охлаждаются в контакте с опорной матрицей, пуансоном, прижимом,

интенсивность нагрева должна быть значительной и увеличение затрат на изготовление изделий также будет значительным.

В работе [41] представлены гибридные и комбинированные технологии листовой штамповки, использующие статические и динамические нагрузки с использованием многоцелевого конечно-элементного комплекса ANSYS/LS-DYNA для компьютерного моделирования статико-динамических процессов: вытяжка - формовка и гибка – зафланцовка. Использована магнитно-импульсная установка (МИУ) с частотой 1 - 2Гц. В штампе, в его прижиме и матрице размещены индукторы, соединенные с МИУ. В процессе вытяжки на фланец с обеих сторон воздействуют импульсным магнитным полем, при этом снижаются силы трения и создаются условия, препятствующие потере устойчивости и образованию гофр. На рисунке 1.13 представлены кривые динамического и статического упрочнения.

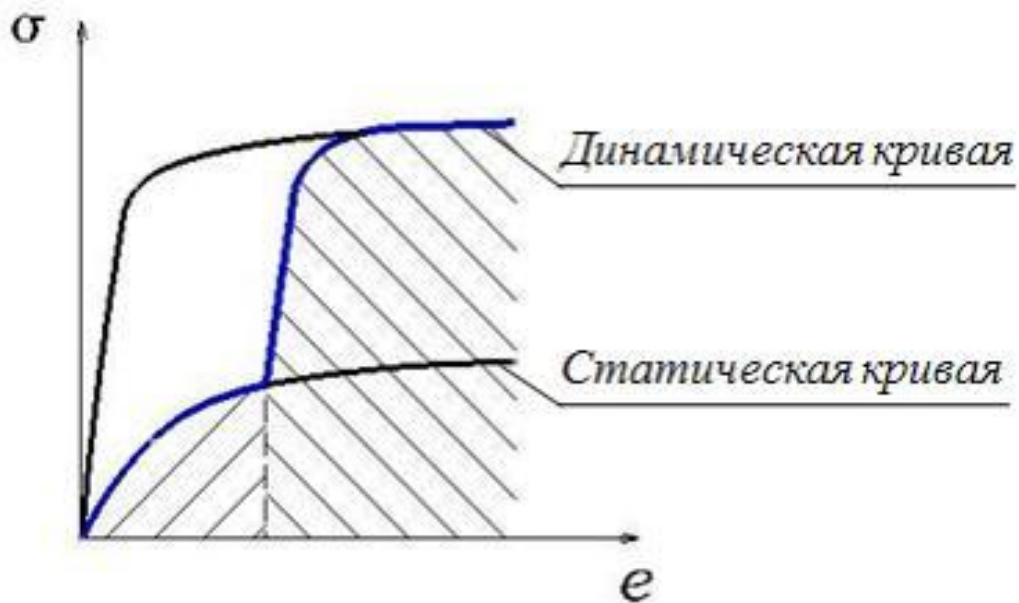


Рисунок 1.13 - Графики зависимости напряжений от деформаций при статических и динамических нагрузках [41]

При осуществлении процесса «вытяжка - формовка» определены изменения пластической деформации, распределение напряжений, изменение толщины заготовки, распределение зон штампуемости.

Программа ANSYS/LS-DYNA позволяет оценить напряженное состояние, распределение деформаций на любой стадии процесса.

Во многих работах изучены условия, при которых становится возможным потеря устойчивости деформируемого листа и нарушение его конфигурации. При этом качество настолько снижается, что изделие оказывается непригодным для использования. Ряд теоретических исследований и опытных данных приведен в литературе [42, 43,45].

В работе С.А.Зайдеса и К.К. Нго изучена локальная деформация упрочнения поверхности с использованием стесненных условий деформирования [46] исследовано нагружение тел в алюминиевых оболочках и способы закрепления деформируемых деталей.

В работах Л.А.Шофмана [16] приведено условие потери устойчивости в виде

$$\frac{R_0 - R_1}{h} \geq C \quad (1.2),$$

где R_0 - наружный радиус заготовки, R_1 - радиус «стакана», т.е. формируемой цилиндрической части изделий, h – толщина листа, C - постоянная величина, фактически она зависит от свойств материала заготовки и условий смазки. Обычно, принимают величину « C », равной 43-46, поэтому, например, из листа толщиной $h=0,5$ мм можно получить цилиндрическое изделие радиусом $R_1=50$ мм только ограниченной длины l_{max} . Действительно, из (1.2) следует, что величина $(R_0 - R_1)$ не должна превышать величину (Ch) . При $C = 45$, $(R_0 - R_1)$ не должно превышать $45 \cdot 0,5 = 22,5$ мм, т.е. $(R_0 - R_1) < Ch$, $R_0 - 50 < 22,5$ или $R_0 < 72,5$ мм.

Поскольку согласно схеме деформации рисунок 1.11, длина изделия приближенно равна $l = R_0 - R_1$, то из этого следует, что $l_{max} \leq 72,5 - 50 = 22,5$ мм. С превышением этой величины, что возможно, если R_0 превысит 72,5 мм, увеличивается вероятность возникновения дефектов за счет образования складок.

Напряженное состояние листовой заготовки в процессе ее деформации рассмотрено ниже.

Можно сделать вывод о том, что для повышения качества при расширении сортамента цилиндрических изделий, получаемых вытяжкой из листовых заготовок, желательно разрабатывать способы деформации, обеспечивающие возможность вытяжки без снижения точности размеров заготовки с повышением устойчивости деформируемой заготовки.

1.3.Современные процессы локальной деформации полых заготовок

Во многих отраслях промышленности необходимы полые заготовки переменного сечения, особенно с утолщенными концами, как показано на рисунке 1.14.

Иногда необходимы заготовки постоянного внутреннего диаметра (рис.1.14а), но также желательно иметь заготовки постоянного наружного диаметра с уменьшенным на некоторой длине внутренним диаметром, рис.1.14б.

Ранее использовали трубы с приваренными к ним втулками длиной 150-200 мм по наружной (или по внутренней) поверхности, но их качество было низким и в процессе эксплуатации они часто разрушались.

Согласно ГОСТ 23786-79 ИСО 5226-85 параметры труб с утолщениями наружу конца варьируются наружными диаметрами от 73мм до 127мм, для труб с утолщениями внутрь конца от 63 до 168мм.

Такие трубы с локальными утолщениями на концевых участках ранее изготавливали серийно на горизонтально-ковочных машинах [46,47,48]. Их масса и необходимые производственные площади очень велики, а затраты на обработку труб весьма значительны. Локальная деформация сжатия (рис.1.14) может привести к нарушению устойчивости за счет

продольного изгиба, что приводит к резкому уменьшению точности размеров заготовок.

Расчеты напряжений при высокотемпературной деформации и условия потери устойчивости приведены в работах [49,50]. Концевые участки заготовок (рис. 1.14) приходится нагревать до 1100-1200⁰С. Деформация на горизонтально-ковочных машинах приводит к образованию облоя толщиной до 2-3 мм, но главный недостаток заключается для тонких труб в том, что они быстро остывают. Поэтому, как указано в [52] приходилось обрабатывать трубы за два перехода, (а иногда, даже за 3-4), с многократным нагревом, что ухудшало структуру металла, а иногда и его прочность.

Иногда возникает необходимость получения утолщенных концевых участков на кривых полых заготовках, как показано на рисунке 1.15, (с увеличением наружного диаметра, рисунок 1.15а, или с уменьшением внутреннего диаметра, рисунок 1.15б).

В этом случае затруднения более значительны: для каждого размера трубы приходится изготавливать индивидуальную оснастку для фиксации и крепления трубы. При этом, поскольку количество труб каждого размера незначительно, затраты исключительно высокие.

Краматорский НИИПТМАШ в период 1980-1982 г.г. разработал комплекс оборудования с новой конструкцией ковочной машины [63,64] для обработки труб. Этот комплекс был изготовлен и успешно работал 15 лет на заводе ОАО «Укруглегеология», что позволило изготовить значительное количество полых заготовок переменного сечения.

Конструкция ковочной машины НИИПТМАШ поясняется рисунком 1.16. Труба 1 зажимается двумя полуматрицами 2 и 3 и концевой участок этой трубы нагревают индуктором до 1150-1180⁰С. После этого концевой участок трубы деформируют усилием Р, приложенным с помощью гидравлического цилиндра. Пуансон 4 снабжен направляющим стержнем

5, препятствующим течению металла внутрь полости трубы, (а с наружной поверхности потеря устойчивости предотвращается матрицами 2 и 3). Полуматрицы имеют возможность перемещения с зажатием трубы 1 при движении ползуна 6. Все указанное устройство находится в станине 7 плиты 8.

Предусмотрено использование нескольких клиньев: 9,10 и 11, в полостях которых расположены фиксаторы 12, 13 и 14. Клин 9 имеет возможность перемещения с помощью привода – гидравлического цилиндра -15. После подачи заготовки 1 в полость между матрицами 2, 3 цилиндром 15 поднимают ползун 6 до соприкосновения с полуматрицами 2,3. При этом фиксатор 14 разомкнут, а фиксаторы 12 и 13 замкнуты. Таким образом, обеспечивается максимальный угол клинового соединения и максимальная скорость перемещения ползуна 6.

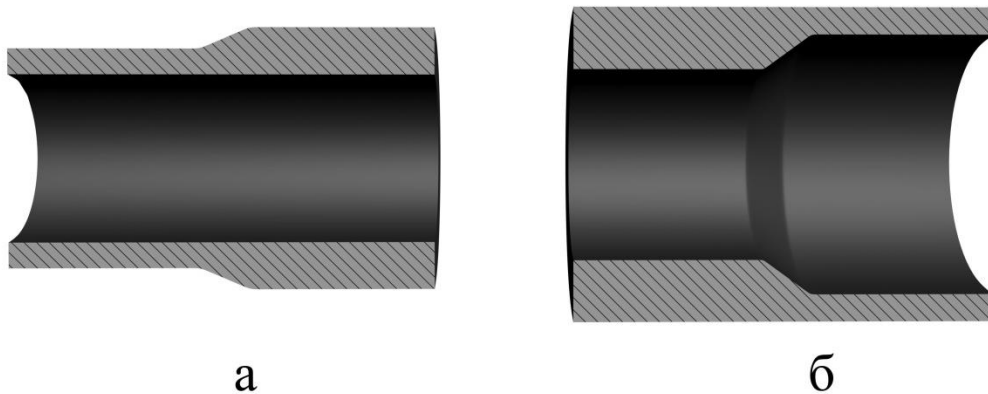


Рисунок 1.14- Концевые участки полых заготовок переменного сечения: а – с увеличенным наружным диаметром; б – с уменьшенным внутренним диаметром

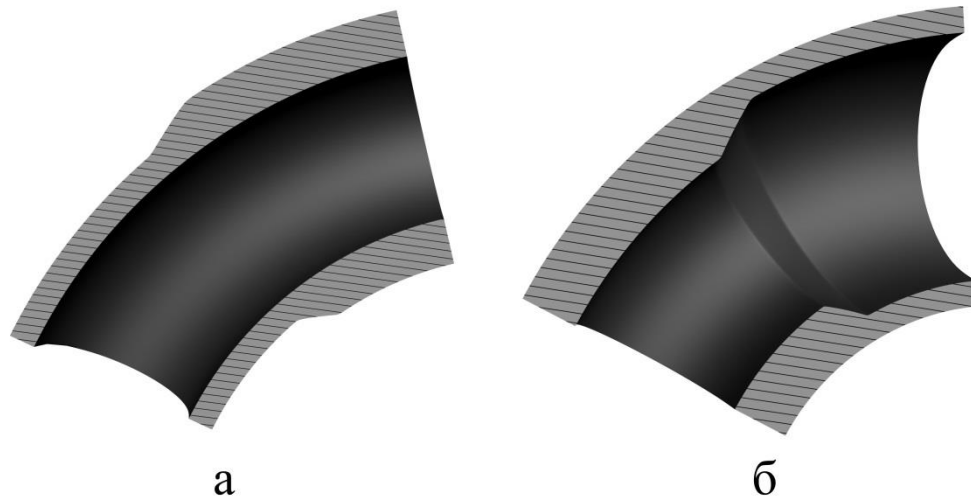


Рисунок 1.15 – Схема криволинейных труб с утолщенными концевыми участками: а – с наружным утолщением; б – внутренним утолщением

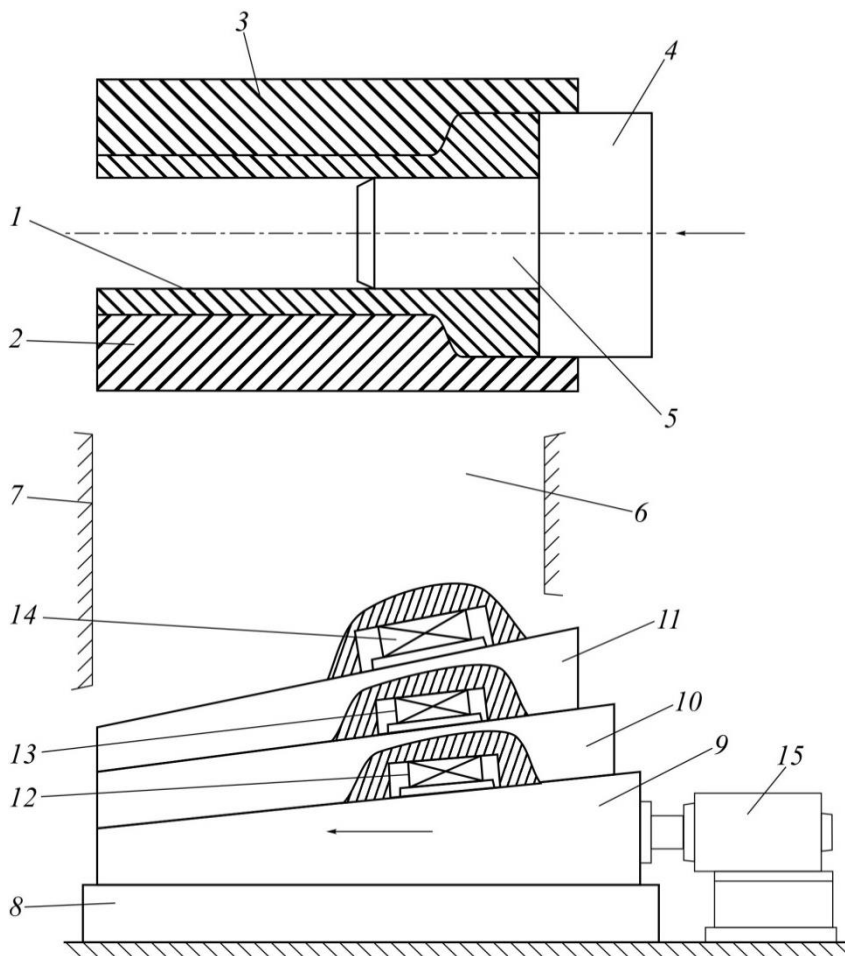


Рисунок 1. 16 – Конструкция ковочной машины НИИПТМАШ

При переходе полуматрицы 2 к полуматрице 3 размыкают фиксатор 13, а фиксаторы 12 и 14 замкнуты, что обеспечивает значительное увеличение усилия. Затем, окончательный зажим полуматриц 2,3 и их прижатие к трубе 1 осуществляют при замкнутых фиксаторах 13, 14 и разомкнутом фиксаторе 12, т.е. при минимальном угле клинового соединения. Этот узел обеспечивает работу клинового соединения с переменным углом: при перемещении ползуна 6 – угол клина максимальный и скорость высокая, а при контакте с заготовкой, угол клина и скорость – уменьшаются, что обеспечивает высокую силу сжатия матриц [64]. Характеристика ковочной машины НИИПМАШ приведена в таблице 1.1.

Отсутствие экспериментальных данных по усилиям деформации затрудняет условия эксплуатации. Оказалось, что при усилии $P=1,1$ МН можно обрабатывать трубы диаметрами до 62-64мм из углеродистых сталей и сталей типа 36Г2С. Возможности увеличения диаметров заготовок затруднены.

Поскольку трубы и полые заготовки переменной толщины требуются во многих отраслях промышленности, установки для реализации таких процессов разрабатывали на ряде предприятий.

На Первоуральском новотрубном заводе сотрудники завода и Уральского федерального университета провели работу по освоению производства насосных компрессорных и бурильных труб с утолщенными концевыми участками [23].

Основными стандартами для поставки бурильных труб являются API 5DP, ГОСТ Р544383-2011, ГОСТ Р50278-92. На практике применяют утолщение концевых участков за счет высадки «внутри» и за счет высадки «наружу». Деформацию в данном случае [23] осуществляют на гидравлическом прессе фирмы «SMS Meer» с усилием при высадке в одном направлении до 2,5 МН, (а в противоположенном около 1,25 МН).

Максимальный диаметр высадки в [23] указан 146,1 мм, а толщина стенки труб $4,8 \div 12,7$ мм. Трубы нагревают в трех индукторах, иногда с промежуточным подогревом.

По рекомендации фирмы «SMS Meer» сначала применяли смазку «Rhenus Thermosyn SGV», (водную эмульсию мелкодисперсного графита с антифрикционными присадками). Спекание смазки приводило к ее значительным потерям.

В [23] исследован процесс с применением смазки «Deltaforge-F-578» (фирмы «Henkel») которая была более эффективной: удалось уменьшить расход смазки более чем в два раза: до 1,84 кг/т.

Таблица 1.1- Характеристика ковочной машины НИИПТМАШ

Наименование показателя	Единица измерений	Величина
1.Усилие деформации трубы	МН	1,1
2.Ход пуансона	мм	160
3.Усилие зажима трубы в матрице	МН	2,0
4.Время рабочего хода	с	4
5.Время нагрева трубы индуктором (ТВЧ)	с	25
6.Габаритные размеры ковочной машины:		
длина	мм	2440
ширина	мм	690
высота	мм	1430
7.Масса ковочной машины	кг	7460
8.Годовая производительность машины	Количество операций	120000
9.Общая масса нестандартного оборудования	кг	8770
10.Общая масса покупного оборудования	кг	9630

Наиболее эффективно - наносить смазку на пуансон непосредственно перед процессом высадки.

Отметим, что специалисты фирмы «Маннесманн АГ» еще в 1987 году разработали проект машины для локальной деформации концевых участков труб, (авторы P.Meissner, H.Presting, E.Schiffers, H.Gunter, и др. патент ФРГ № 3341805, МКИ 4В С, 2700, В21J 13/08). Нагрев концевых участков заготовок осуществляется в печи, к которой трубы перемещают специальным транспортным устройством. После нагрева трубы подают подвижными стеллажами транспортного устройства к прессу. Отметим, что в процессе транспортировки труб от печи к прессу неизбежным является охлаждение нагретого металла, что завышает расход энергии. Кроме того, печи в таком режиме используются нерационально и расход энергии значителен.

На наш взгляд, более предпочтительным является принятый в РФ способ нагрева концевых участков труб индукторами, непосредственно в ковочной машине после подачи к ней заготовки.

При реализации локальной деформации заготовок существенное влияние могут оказывать колебания их температуры.

Из-за колебаний температуры (на Δt) возможно изменение размеров и пуансона и матрицы. При этом относительное изменение диаметра $\frac{\Delta d}{d} = \alpha \Delta t$, где α - коэффициент термического удлинения.

При $\alpha = 10^{-5} \text{гр}^{-1}$ и $\Delta t = 50^\circ\text{C}$, $\frac{\Delta d}{d} = 5 \cdot 10^{-4}$ величина незначительна, (например, при $d = 50 \text{мм}$, $\Delta d = 0,0250 \text{мм}$).

Однако, при эксплуатации ковочной машины обнаружено, что в ряде случаев заготовка оказывается переохлажденной, например, при задержках, неполадках с оборудованием, установкой ТВЧ, подачей заготовок.

Ввиду малой толщины, это приводит к существенному переохлаждению полых заготовок и если их температура снижается менее 1050°C , то резко возрастает количество некачественных изделий, не

обеспечивается формирование концевых участков на требуемой их длине. Количество дефектных заготовок достигает 5-7%, что приводит к убыткам.

Следует также отметить, что остается нерешенным вопрос о формировании утолщенных участков полых заготовок для труб с криволинейными осями (рис.1.15).

1.4. Повышение точности размеров заготовок при деформации упругопластического изгиба

Процессы деформации упругопластического изгиба широко используются на металлургических и машиностроительных заводах. Во многих случаях необходимо из плоского листа или сортовой заготовки получить заготовку заданной кривизны. Простейшая схема изгиба заготовки усилием, приложенным с помощью ролика (или пуансона) показана на рис.1.17. Здесь же показана и эпюра изгибающих моментов.

Процесс изгибной деформации следует называть именно упругопластическим, поскольку реализация только упругой деформации заготовки приводит к тому, что ее размеры после деформации восстанавливаются, и ее параметры не изменяются. С другой стороны, процесс нельзя назвать только процессом «пластической деформации», поскольку вблизи опор момент уменьшается до нуля и в этих зонах неизбежным является наличие только упругих деформаций. Таким образом, деформация изгиба, рис.1.17, связана с наличием в деформируемой заготовке двух зон: упругой и пластической.

Упругопластическим изгибом осуществляют и правку листов либо сортового металла [45], и изготовление криволинейных заготовок, например, изгибом профилей или листов[46-49].

Широко используют процессы изгиба в прокатном производстве [50-53], в том числе и для производства труб больших диаметров [49].

Процессы изгиба труб были рассмотрены в ряде работ [54–56]. Особое значение приобрели эти процессы в связи с расширением производства труб больших диаметров для трубопроводов транспортировки газов и жидкостей [57–58].

В работе [59] было показано, что изгиб заготовок в процессе их движения, (например, через систему роликов, рис.1.18), существенно отличается от изгиба неподвижных заготовок (пуансонами или роликами) в направлении, перпендикулярном оси неподвижной заготовки. Ряд способов расчета деформации в процессе изгиба изложен в работах [50, 60-62]. Правку заготовок иногда осуществляют с помощью прессов, но чаще на роликоправильных машинах, в которых заготовку перемещают через систему роликов с перегибами и изменением знака кривизны (рис.1.18).

Если заготовка на двух опорах нагружена силой P в середине пролета, то при $x \leq 0,5l$ изгибающий момент равен $M=0,5Px$, где начало горизонтальной оси координат x находится на левой опоре заготовки (рис.1.17).

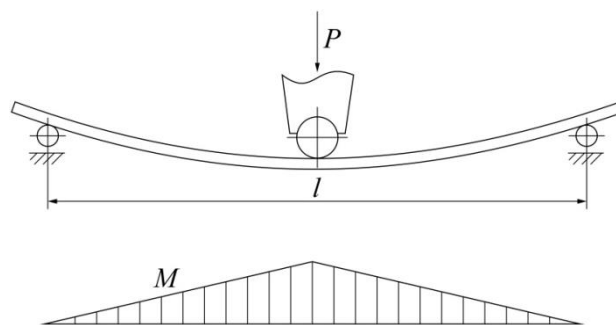


Рисунок 1.17- Схема изгиба заготовки силой P и эпюра изгибающих моментов

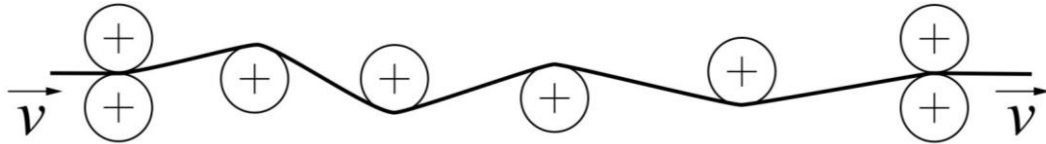


Рисунок 1.18.- Схема деформации изгиба заготовки при ее движении через систему роликов

В области упругой деформации кривизна K определяется на основе закона Гука и гипотезы «плоских сечений», согласно которым деформация изгиба $\varepsilon = K \cdot y$, (y - расстояние до нейтральной оси).

Поскольку $\sigma = E \cdot k \cdot y$, то изгибающий момент для симметричных сечений в виде прямоугольника размерами $b \times h$.

$$M(x) = 2 \int_0^{0,5h} b E k y^2 dy = E K I \quad (1.3),$$

где I - момент инерции сечения заготовки, для прямоугольного сечения

$$M(x) = \frac{E b h^3}{12} K \text{ или } K = \frac{6 P x}{E b h^3}.$$

Удобно, следуя работе [59], ввести два безразмерных параметра

$$a = \frac{\sigma_T l}{E h}, \quad m = \frac{P l}{4 \sigma_T b h^2}, \quad (1.4)$$

первый, из которых характеризует соотношение упругих и пластических свойств металла, а второй интенсивность нагрузки по отношению к сопротивлению пластической деформации.

Тогда кривизна K равна

$$K = \frac{24 a m x}{l^2} \quad (1.5)$$

- в области упругих деформаций.

Если величина $m = \frac{1}{6}$, то при $x = 0,5l$; $y = \pm 0,5h$; $\sigma = \sigma_T$ начинается пластическая деформация, рассмотренная во многих работах, [49,58-60].

В зоне пластической деформации при $x > \frac{l}{12m}$

$$K = \frac{2a}{l \sqrt{3} \sqrt{1-4m}} \quad (1.6)$$

максимального значения кривизна достигает при $\frac{x}{l} = 0,5$, когда

$K(0,5l) = \frac{2a}{l\sqrt{3}\sqrt{1-4m}}$ и видно, что при $m \rightarrow 0,25$ $K(0,5l) \rightarrow \infty$ и это соответствует для материала без упрочнения потере несущей способности заготовки. Преимущества использования параметров «а» и «m» состоят в том, что как видно из формул (1.5), (1.6), кривизна линейно зависит от параметра «а» и при упругой, и при пластической деформации. Нелинейность при пластической деформации характерна только для зависимости кривизны от параметра нагрузки – «m».

На рис.1.19 показана машина для правки листов, использованная на стане 3600 металлургического комбината «Азовсталь». Она предназначена для правки листов толщиной от 17 до 50 мм, шириной до 3450 мм, с пределом текучести материала до 1000 МН/м², [65].

Лист 1, подвергаемый деформации, располагается между двумя рядами рабочих роликов 2 – 8, находящихся один относительно другого в шахматном порядке. При работе по технологической схеме, рабочие ролики 3 – 7 сообщают перемещающемуся между ними листу ряд перегибов. Ролик 8 выполнен таким, что его положение можно регулировать.

Его стремятся установить таким образом, чтобы обеспечить устранение кривизны листа.

Ролики 1 и 9 по конструкции выполняют одинаковыми для использования машины на реверсивном режиме работы; при нереверсивной работе первый ролик по ходу листа устанавливается из условия беспрепятственной подачи листов в машину (рис.1.19).

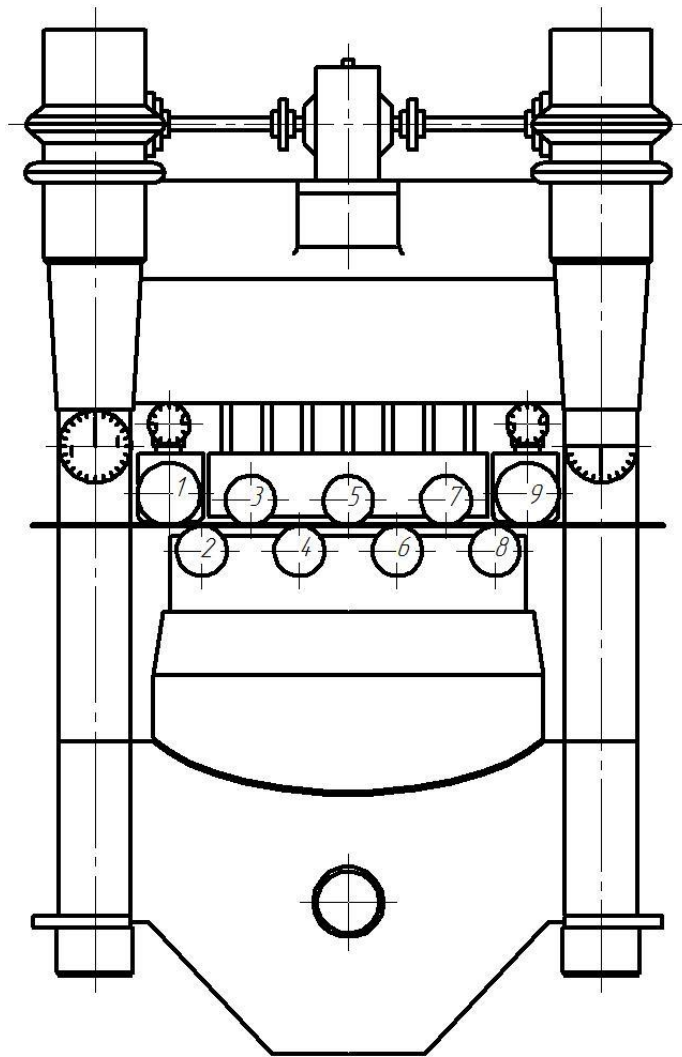


Рисунок 1.19 – Машина для правки листов толщиной до 50 мм

Во многих машинах изгиб реализуют рабочими роликами малого диаметра, которые находятся в контакте с более жесткими опорными роликами (больших диаметров) [45].

Подшипниковые опоры роликов 3 – 7, рис.1.19 расположены в одном корпусе и перемещаются по высоте совместно от одного электродвигателя. Верхняя траверса перемещается в пазах вертикальных рам станины. Подшипники нижних роликов расположены в общей траверсе, которая может быть установлена симметрично или под определенным углом.

С начала 1980 годов начали применять машины для правки заготовок, находящихся на неподвижных опорах и совершающих движение через обойму роликов и возвратно-поступательное движение в направлении, перпендикулярном оси заготовки.

Если (рис.1.20), заготовка 1 опирается на ролики 2 и 3 и совершает движение через обойму роликов 4 и 5, то она при этом подвергается знакопеременному изгибу[45, 64].

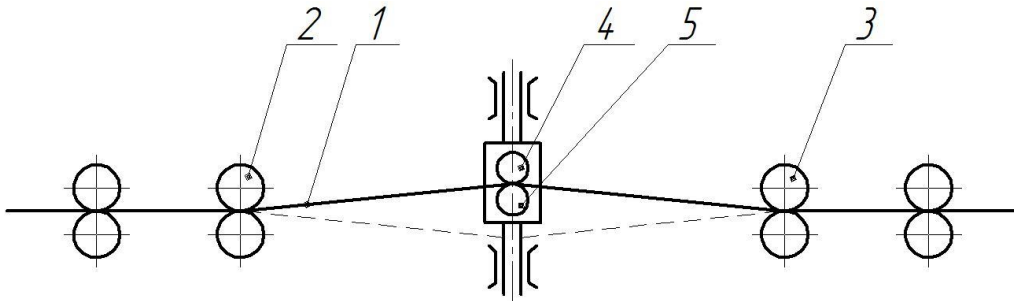


Рисунок 1.20 – Схема деформации листа при его движении через качающуюся роликую обойму

При изгибе участка заготовки между роликами 2, 3 определенным усилием, эпюра изгибающего момента имеет форму «треугольника». Момент, (а, следовательно, кривизна заготовки) возрастают при движении заготовки 1 между роликами 2 и 4 – 5, а после прохождения роликов 4 – 5 момент уменьшается.

Если в конструкциях по рис.1.19 знакопеременный изгиб реализовался установкой 7, 9 или даже 15 – 17 роликов, то в конструкции на рис.1.20 число циклов нагружения, (в том числе и при изменении знака прогиба) можно увеличить и регулировать скоростью колебаний обоймы роликов 4 – 5. При высокой скорости колебаний можно обеспечить в заготовке 1 даже 18 – 20 циклов знакопеременной нагрузки за то время, за которое каждый ее участок переместится от обоймы 4 до роликов 3. Причем число циклов деформаций изгиба легко регулировать, (в отличие от конструкции на рис.1.19, в которых настройка роликов является сложной и трудоемкой операцией).

Для правки не листа, а сортовых профилей требуется реализовать изгиб в двух, взаимно-перпендикулярных направлениях.

Такие машины известны, например, на рис.1.21 показана двухплоскостная сортоправильная машина конструкции ВНИИМЕТМАШ, [45].

Группа роликов 1 обеспечивает изгиб в вертикальном направлении, четыре ролика нижнего ряда выполнены приводными. Червячно-винтовые устройства – 2 определяют положение роликов верхнего ряда и прогибы. В корпусах 3 и 4 расположены конические шестерни, и привод через шпиндель 5 осуществляется от электродвигателя 6 через комбинированную шестеренную клетку 7 и муфту 8. Вторая группа роликов – 9 реализует изгиб в горизонтальном направлении. Эта правильная машина предназначена для правки изделий с поперечным сечением от 36 до 200 мм².

Английской фирмой «Бронкс» подобного рода машины изготавливаются для правки более крупного сорта. Наибольшая из них может осуществлять правку круглых профилей диаметрами до 95 мм и других сечений. Вопросы деформации труб были рассмотрены также в работах [66 – 69].

Ряд машин для осуществления знакопеременного изгиба создали фирмы «Блау - Нокс» (США) и «Бронкс» (Англия)[69]. Были попытки разработки устройств с созданием изгиба путем последовательных циклов «нагрев – охлаждение» сортовой заготовки в процессе ее движения.

Заготовка 1, например, в форме трубы прямоугольного сечения, совершает движение с помощью роликов 2 через вращающуюся обойму, которая включает не только горизонтальные ролики 3, но и два вертикальных ролика 4 (рис.1.22а). Приводные ролики 5 обеспечивают перемещение, (как и ролики 2). Сечение трубы показано в разрезе А-А (рис.1.22б).

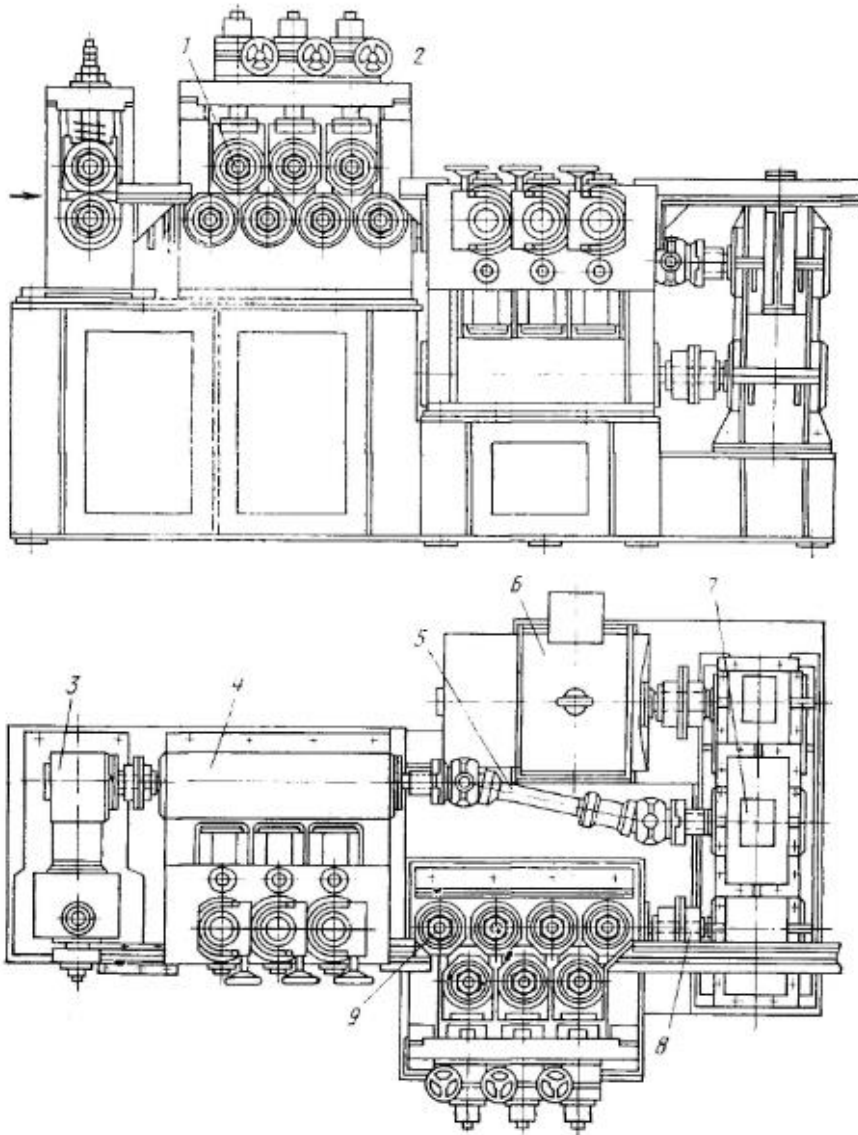


Рисунок 1.21 – Машина конструкции ВНИИМЕТМАШ для правки знакопеременным изгибом сортовых профилей

Заготовка (труба) может быть изогнута и в направлении оси x на величину δ_x , и в направлении оси y на δ_y . Это определяется положением роликов 3, 4. Обойма перемещается, совершая движение по замкнутой траектории.

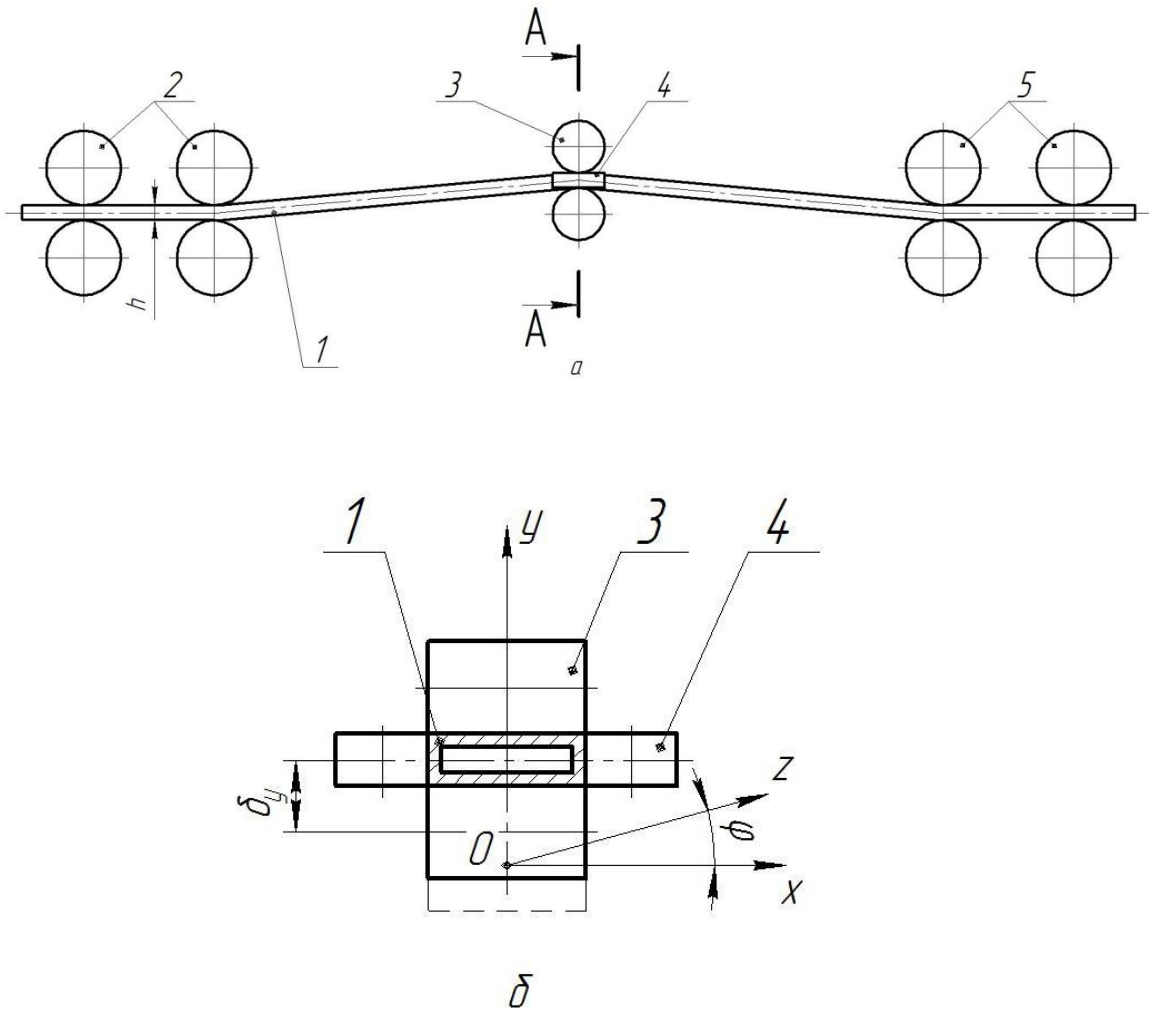


Рисунок 1.22 – Схема изгиба заготовки обоймой роликов, совершающих движение по замкнутой траектории

Положение сечения до изгиба показано на рис.1.22б штриховыми линиями.

В процессе движения участка трубы от роликов 2 к роликам 5 через вращающиеся обоймы (число которых может быть от одного до трех) труба подвергается многократному изгибу.

При положении центра обоймы в точке А прогиб в направлении осей x и y составляет соответственно $\delta_x = OB$ и $\delta_y = OC$. Нейтральная ось Oz вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа (рис.1.23) и проходящей через точку O .

Величина начальной кривизны трубы перед правкой колеблется в широких пределах, являясь случайной функцией длины. Поэтому

роликовые машины с перегибом заготовки и с постоянным положением роликов требуемой точности правки не обеспечивают. При многократном изгибе относительно вращающейся оси достигается более высокая степень деформации.

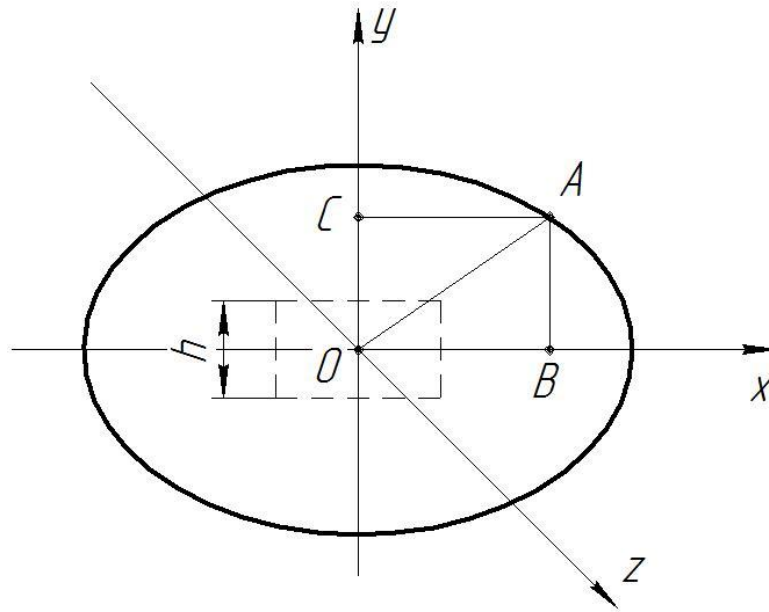


Рисунок 1.23 – Траектория движение центра сечения трубы прямоугольного сечения

Другим важным преимуществом этого технологического процесса является возможность обеспечить большое число циклов изгиба и, следовательно, более высокую однородность механических свойств. Ряд конструкций правильных машин с роликовыми обоймами разработал и внедрил Краматорский НИИПТМАШ [65].

В одной из машин труба последовательно перемещается через три вращающихся обоймы. Две крайние обоймы вращаются в одном направлении, а средняя – в противоположном. Расположение трубы в обойме из конических роликов показано на рис.1.24. Каждая клеть снабжена электродвигателем постоянного тока с питанием от одного генератора, позволяющего изменять частоту вращения независимо от изменения частоты вращения тянущих и задающих клетей. Вращение электродвигателей синхронизировано, для чего все три клетки связаны

между собой специальными синхронизирующими муфтами. Мощность каждого электродвигателя равна 22 кВт; максимальная частота 1500 об/мин может регулироваться в сторону снижения в диапазоне 1:10. Экспериментальные измерения показали, что потребляемая мощность двигателя при правке труб 50 x 50 x 6 мм из углеродистой стали при скорости 2 – 3,4 м/с равна 1,0 – 2,5 кВт.

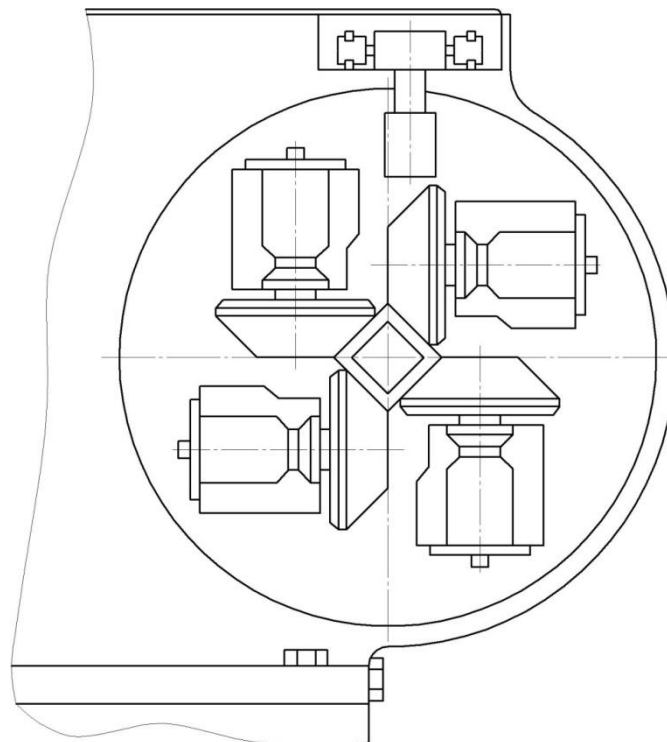


Рисунок 1.24 – Схема расположения квадратной трубы в обойме, совершающей движение по замкнутой траектории.

Также НИИПТМАШ была разработана конструкция машины с коническими эксцентричными роликами [64].

Ролики задающих и тянущих клеток перемещают трубу через правильные ролики, что обеспечивает перемещение калибров по заданной траектории, при этом правильные ролики не перемещают трубу вдоль ее оси, поскольку они не связаны жестко со шпинделями, а калибры соседних клеток колеблются по своим траекториям в противоположном направлении. Эти колебания подвергают трубу многоплоскостному изгибу для правки.

Эта машина была изготовлена Краматорским НИИПТМАШ и введена в эксплуатацию на Руставском металлургическом заводе для правки труб сечениями 42x42x4 мм, 60x40x4 мм, 50x35x2,5 мм и других сечений. Начальную кривизну труб не желательно допускать более 20 мм на один метр длины (и также лучше подвергать их перед правкой отжигу для снятия остаточных напряжений).

Рассматривая в целом тенденции развития конструкций оборудования для изгиба заготовок, можно сделать вывод о том, что за последние 20 лет достигнуты значительные успехи в создании машин для изгиба заготовок большой длины, длинных сортовых профилей и труб различных сечений. Определенные преимущества имеют машины с качающимися обоймами (по сравнению с использованием стационарных роликов, реализующих перегибы заготовок).

Но гораздо хуже состояние технологии изгиба коротких (менее 5 – 6 м) заготовок, используемых в машиностроении. При изгибе неподвижных заготовок давлением пуансона или ролика деформация является очень неоднородной – на значительной части длины заготовки пластической деформации на существующих машинах добиться невозможно, поэтому кривизна оказывается существенно переменной по длине заготовок.

Поэтому точность их размеров оказывается низкой, что приводит к значительным потерям металла при последующей механической обработке.

В последние годы увеличивается производство труб больших диаметров для магистральных трубопроводов диаметрами до 1420 мм и более. Такая технология описана В.Н.Шинкиным [49, 70, 72], а также исследована в работах [73-78].

Увеличение производства труб для трубопроводов и увеличение давления: от 75атм до 100-200атм для газопроводов, от 55атм до 75-100 атм – для нефтепроводов привело и к увеличению толщин стенок труб, (до

35-40мм) и к увеличению прочности материалов, (до $565 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$), ударной вязкости (до 180-240 $\frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$ при $-20 - 40^\circ\text{C}$), хладностойкости и свариваемости, [78].

Как указано в работе Ю.Д.Морозова с соавторами, это привело к необходимости перехода от контролируемой прокатки сталей феррито-перлитной структуры со средним размером зерна 5мкм к прокатке сталей с феррито-бейнитной структурой, с размерами зерен около 1 мкм [78].

Для этого технологию прокатки изменили при следующих тенденциях:

- а) уменьшили содержание углерода до 0,03-0,05% и менее;
- б) применили микролегирование ниобием, титаном, вольфрамом;
- в) использовали легирование такими элементами, как Mn, Mo, Ni, Cr;
- г) уменьшили содержание примесей: серы (менее 0,002%), фосфора (менее 0,010%); газов азота (менее 0,006%) и других газов;
- д) использовали ускоренное охлаждение [78] после деформации.

Некоторые характеристики современных трубопроводов, в том числе подводных морских (по дну Балтийского моря – «Норд-Стрим» по дну Черного моря в Турцию «Южный поток») приведены в таблице 1.2 [78]. Протяженность магистральных Российских трубопроводов превышает 240 тысяч километров; по ним перекачивают 80% добываемой нефти [78], 100% газа и более 20% продуктов нефтепереработки. Помимо трубопроводов для газа, нефтепродуктов находят применение аммиакопроводы. Используют трубы с одним или двумя прямыми сварными швами, а также спиралешовные. Но в зоне металла, примыкающей к сварному шву, прочность может быть понижена, поэтому следует отдавать предпочтение таким трубам, у которых длина сварного шва минимальна: это трубы с одним прямым швом.

Микролегирование стали такими элементами, как ниобий, способствует повышению прочности металла. Содержание в твердом

растворе ниобия снижает температуру структурного превращения стали $\gamma \rightarrow \alpha$ и способствует образованию бейнита. Уменьшение содержания углерода, конечно, снижает прочность и предел текучести, что несколько облегчает реализацию изгиба заготовок, но способствует повышению хладостойкости сталей, что особенно важно для северных трубопроводов.

Таблица 1.2 - Характеристика труб для современных трубопроводов

Транспортная система	Диаметр трубы, мм	Толщина стенки трубы, мм	Давление, атм	Класс прочности стали-материала трубы
Газопровод «Норд – Стрим» СЕГ наземная часть	1420	21,6-32	100	K60
Газопровод «Норд-Стрим» СЕГ подводная часть трубопровода	1219	33,0-39,0	200	X70
Газопровод «Ямал-Центр»	1420	24,9-36,7	120	X65 K65
Нефтепровод «Восточная Сибирь-Тихий Океан», «Тайшет-Сковородино»	1067	11-27	75-100	K56 K60
Газопровод «Бованенково-Ухта» наземная часть	1420	23÷27,7	120	K60 K 65

На реверсивных прокатных станах используют для прокатки листов для последующего получения из них труб менее прочную сталь X65, а для прокатки листов из феррито-бейнитной стали X80 используют термомеханическую обработку с ускоренным охлаждением.

При производстве листовой стали более высокой прочности X100-X120 используют закалку с отпуском или охлаждение с высокой скоростью 20-25 градусов в секунду с самоотпуском при 550-600⁰С [78].

Из полученных листов процессами изгиба получают трубы больших диаметров. Часто используют процесс шаговой формовки, при котором реализуют изгиб концевого участка листа, затем перемещают лист, (вдоль его длины), останавливают и реализуют изгиб следующего участка. После этого вновь перемещают лист вдоль его длины и повторяют последовательно процессы деформации изгиба и перемещения листа, как показано на рис. 1.25. Эти процессы повторяют до завершения деформирования цилиндрической оболочки. Изгиб осуществляют давлением ролика или (чаще) пуансона с криволинейной поверхностью [49].

Лист 1 периодически подают на определенную величину (шага), как указано стрелкой на рис. 1.25. Затем лист останавливают и роликом 2 осуществляют изгиб части листа, расположенной на роликах 3,4. После этого вновь осуществляют подачу листа и таким образом формируют заготовку трубы для последующей ее сварки (вдоль продольного шва).

Такие процессы применяют сейчас для производства труб класса прочности K65 согласно стандарту API [70] для магистральных трубопроводов. Изготавливают трубы длиной до 18м и с толщиной стенок до 52-55 мм, используя технологию немецкой фирмы «SMS MEER».

При шаговой формовке согласно рисунку 1.25 концевые участки трубы все равно будут плоскими, поскольку осуществить на этих участках пластический изгиб невозможно. Труба будет иметь конфигурацию согласно рисунку 1.26.

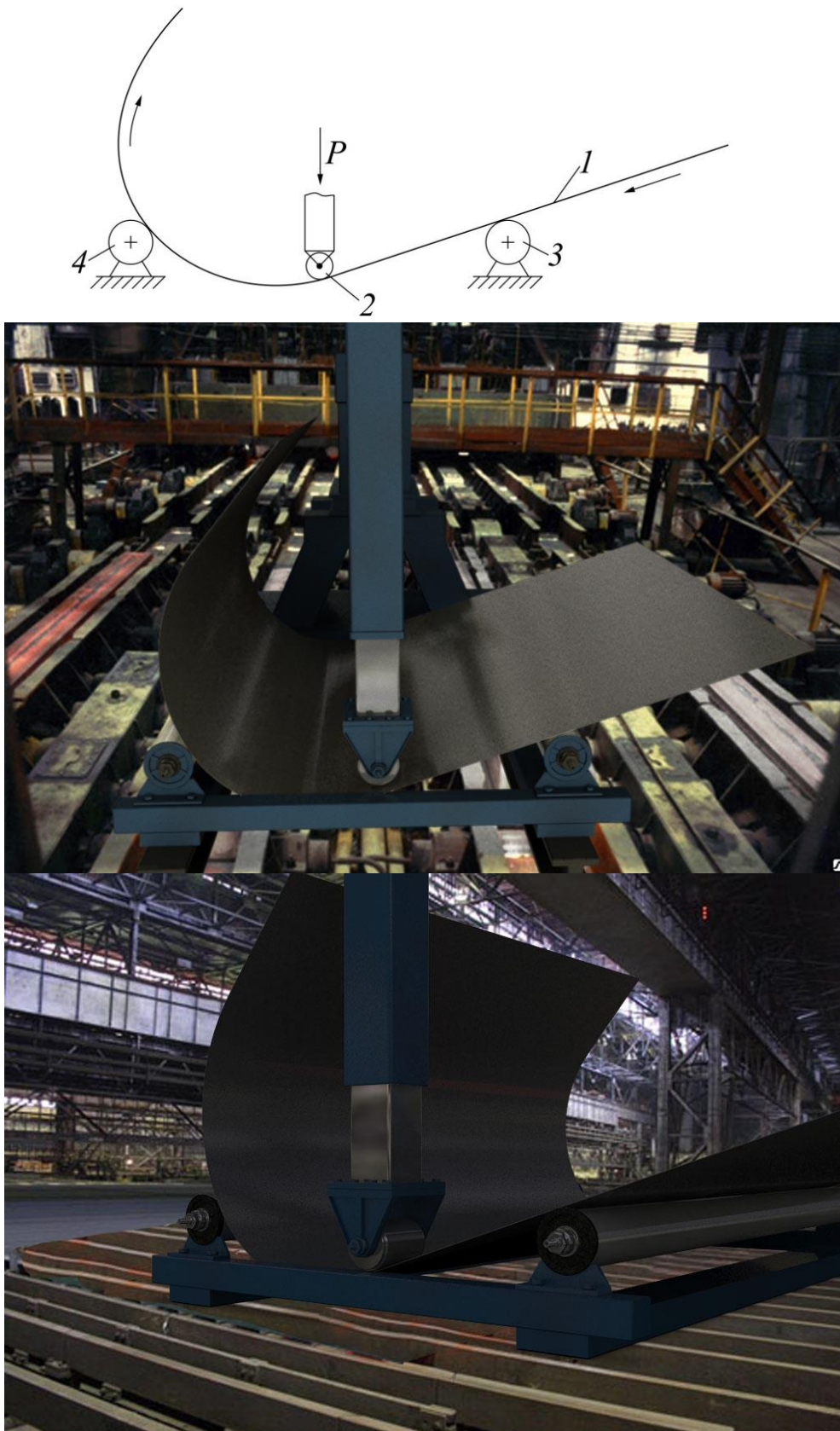


Рисунок 1.25 – Схема упругопластического изгиба при шаговой формовке труб: 1 – лист; 2 – изгибающий (формующий) ролик; 3,4 – опорные ролики

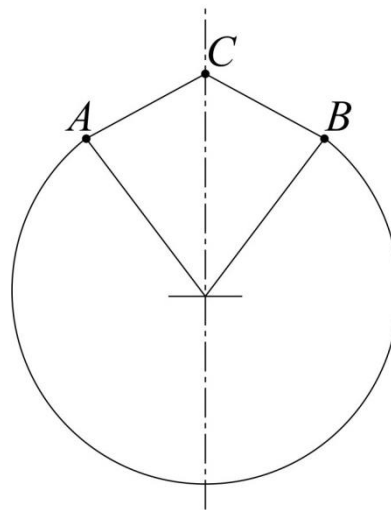


Рисунок 1.26 -Схема сечения трубы после завершения ее формовки

Прямые участки AC и BC приведут к появлению значительных изгибных напряжений, что уменьшит прочность и долговечность трубы. Поэтому концевые участки подвергают дополнительной деформации в штампах для того, чтобы придать им необходимую кривизну. Схемы различных этапов деформации поясняются рис.1.27. На рисунке 1.27а показана деформация штамповки кромок листа, а на рисунке 1.27б и 1.27в деформация изгиба, реализуемая штампом, усилие которого P воздействует на заготовку после ее подачи на расстояние, равное 0,20-0,30 расстояния между опорами и остановки.

На рисунке 1.27г показана завершающая стадия формовки, после чего заготовка передается на участок сварки.

Процесс, разработанный фирмой SMS MEER, использует ряд заводов, в том числе и в России, (ОАО Выксунский металлургический завод», ЗАО «Ижорский трубный завод» и другие), [49].

Процесс иллюстрируется рис. 1.28, где на схеме рис. 1.28а показана операция стыковки воздействием усилий P , а на рис. 1.28б – четырехдуговая сварка внутреннего шва. На рис. 1.28в показана сварка наружного шва, (также четырехдуговая) [49].

Поскольку конфигурация трубы после сварки имеет вид согласно рис. 1.26, точность профиля низкая, (в нем имеются участки «нулевой кривизны»).

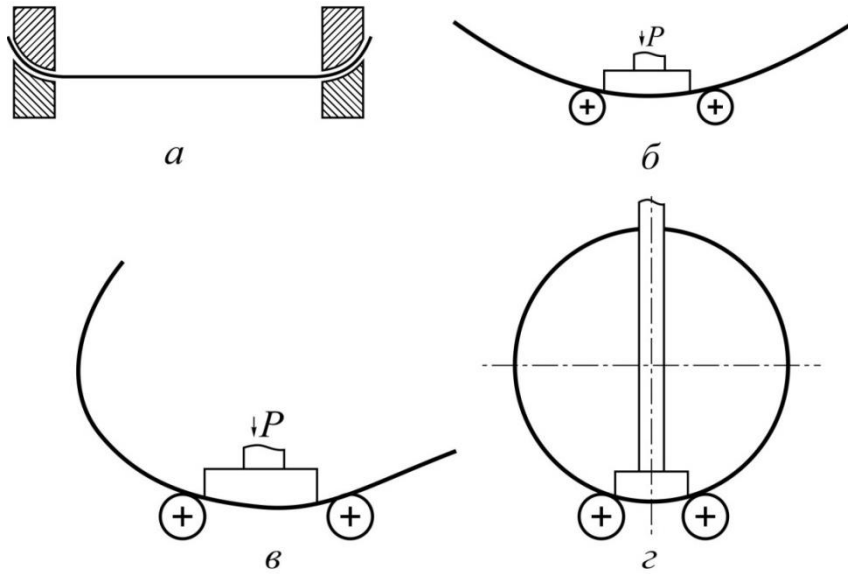


Рисунок 1.27- Схемы формовки трубы из плоской заготовки

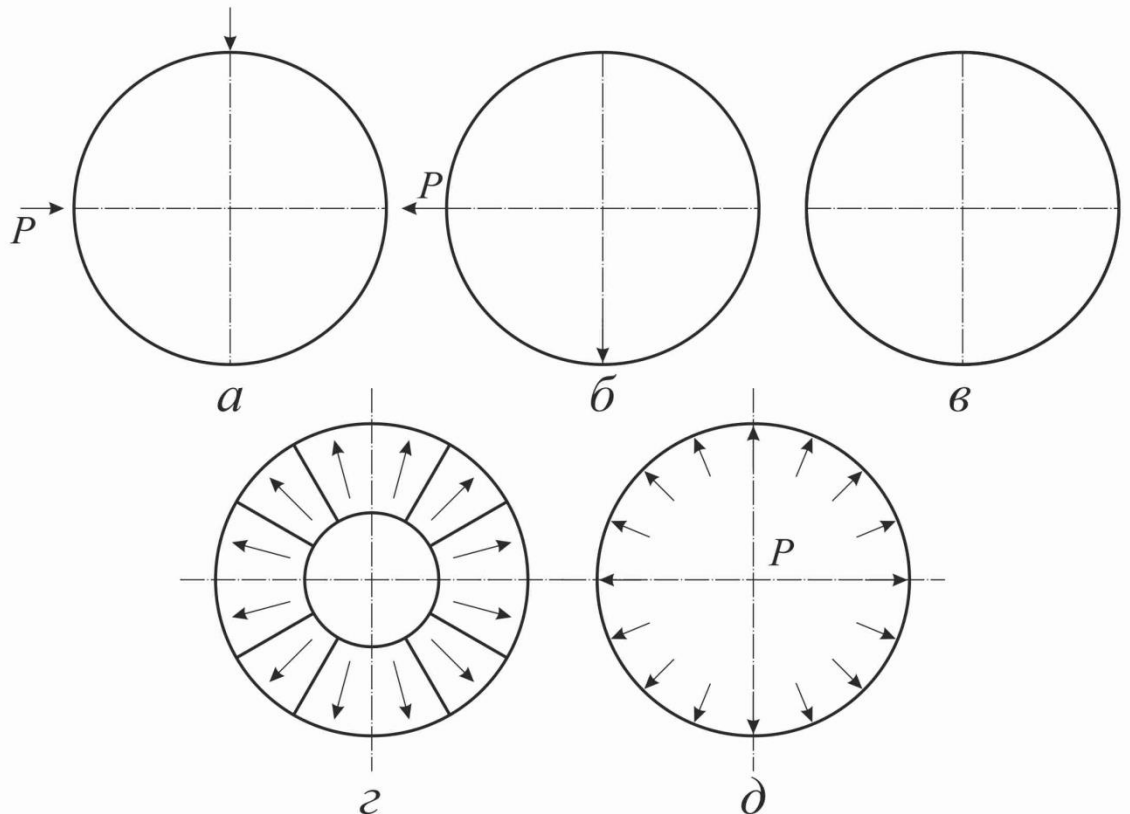


Рисунок 1.28 – Схемы изготовления трубы: а - стыковка усилиями P и нанесение сборочного шва; б - четырехдуговая сварка внутренней части

шва; в - четырехдуговая наружной части шва; г- процесс экспандирования; д – гидравлические испытания трубы давлением Р

При формовке также может возникать дефект – появление «точки перегиба», т.е. сечения, где вторая производная функции, описывающей профиль трубы, и кривизна равны нулю. В таких сечениях безмоментное напряженное состояние невозможно и появляются изгибные напряжения, которые могут привести к развитию трещин. В работе [49] отмечено, что «в таком состоянии труба непригодна для использования ее для сварочных работ при строительстве магистральных трубопроводов», [49] (стр.599).

Разность диаметров в поперечных сечениях трубы достигает 8-15мм, а сам диаметр может отклоняться от проектного на 1,0-1,5%.

Поэтому применяют операцию «экспандирования», рис. 1.28г, при которой в трубу вводят 12 стальных сегментов и 12 клиньев, которые обеспечивают движение сегментов в радиальных направлениях. При этом они воздействуют на трубу усилиями, (показанными на рисунке 1.28г стрелками), и увеличивают диаметр трубы. После этого осуществляют гидравлические испытания труб давлением жидкости, рис. 1.28д. При экспандировании, (по технологии ICOE фирмы «SMS MEER») форма трубы улучшается.

Однако при экспандировании могут возникать значительные напряжения растяжения, в том числе в зоне сварного шва и в зонах соединения наплавленного металла, где могут возникать расслоения и поры. Экспандирование улучшает точность размеров трубы, но не может устранить поры и трещины, даже возможно развитие трещин и увеличение их длины, что может привести к последующему разрушению трубы.

1.5. Особенности нестационарных процессов пластической деформации

В таких процессах, как изготовление цилиндрических стаканов вытяжкой, или локальная деформация осадки концевых участков труб степень деформации закономерно (и монотонно) возрастает и с ее увеличением, как будет показано ниже, снижается точность размеров заготовки. При этом одновременно возрастает тенденция к потере устойчивости процесса деформации, при которой процесс деформации резко изменяется и приобретает отличия от проектного.

Плоская круглая листовая заготовка может потерять свою форму, (становиться волнистой), а полая заготовка, подвергаемая локальному сжатию, может стать существенно криволинейной. Отклонения от проектных размеров могут не только увеличиваться, но «существенно увеличиваться» - на порядок и более, что приводит не просто к ухудшению качества, а к получению дефектных изделий.

Следует отметить, что задача обеспечить возможность изготовления труб с криволинейными осями и с утолщенными концевыми участками до настоящего времени не была решена: не было известно конструкций ковочных машин для обработки концевых участков криволинейных труб, что создает значительные затруднения для энергетического машиностроения.

При использовании процесса деформации изгиба неоднородность величин деформации еще более значительна, в части объема деформируемой заготовки создать пластическую деформацию, вообще, оказывается невозможным.

Причем, эти зоны, (зоны упругой деформации) не малы, они могут составлять до $2/3$ объема деформируемого тела.

Очевидно, что процесс деформации, при котором пластическая деформация не осуществляется в 67% объема заготовки, не может

обеспечить высокой точности размеров, полученных изделий (и их постоянство по объему изделий). Это является недостатком технологического процесса.

В данной работе основное внимание уделяется вопросам, как следует изменить технологические процессы, чтобы обеспечить повышение их стабильности (и во времени и по объему деформируемых тел). Это должно обеспечить не только повышение точности заготовок, но и возможности расширения сортамента изготавливаемых изделий за счет совершенствования технологических процессов. Одновременно, рассмотрены задачи создания оборудования для реализации усовершенствованных технологических процессов.

Технология высадки концов труб нефтяного сортамента на ОАО «Первоуральский новотрубный завод» [41] в зависимости от размеров и вида утолщений концов труб предусматривает применение одного или двух нагревов конца трубы на гидравлических прессах или горизонтально-ковочных машинах путем осаживания трубы в закрытую полость разъемных матриц, рисунок 1.29.

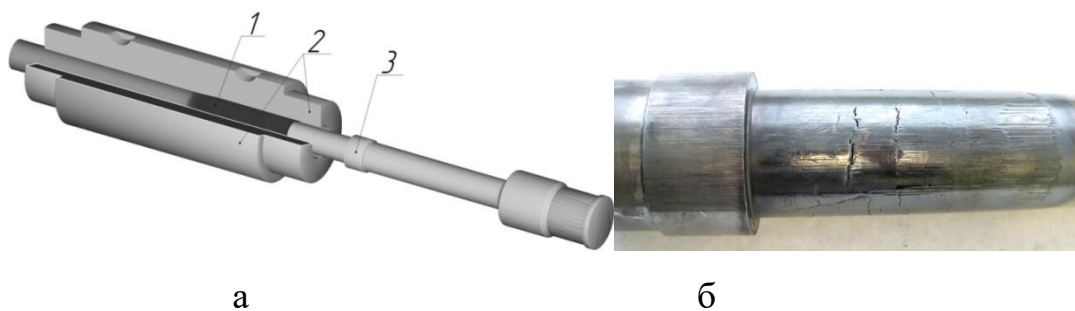


Рисунок 1.29 – Технология получения труб с утолщенными концами на ОАО «Первоуральский новотрубный завод»: а - схема высадки конца трубы: 1- труба, 2 – комплект матриц; 3 – пуансон; б - сетка разгара и поперечная трещина на поверхности пуансона[41]

Насосно-компрессорные трубы изготавливают по стандартам ГОСТ 633-80; ГОСТ 53366-2009; API 5 CT; API 5DP; ГОСТ 3 54383 – 2011 и ГОСТ Р 50278-92 высадкой концов труб наружу, вовнутрь или

комбинировано. Технология реализована на прессе фирмы SMS MEER. Трубы из загрузочного устройства поштучно передаются для нагрева концов в три индуктора: в первом и втором осуществляют предварительный нагрев до температуры 850⁰С, в третьем – до 1240-1280⁰С. Клещевой манипулятор фиксирует трубы в клещевых зажимных кулачках пресса, каретка пуансонодержателя совершает холостой и рабочие ходы, осуществляя формоизменение конца трубы за 1,7-2,5 с. Утолщения на концах бурильных труб выполняют за несколько переходов с промежуточным подогревом металла для уменьшения усилия прессования и степени деформации за проход, применялась смазка Deitaforge F-578 производства фирмы Henkel с расходом до 1,84 кг/т. Усилие деформации составляет 350 кН, давление в главном цилиндре пресса – 10-15 МПа. Выход годного составлял 73%. Основными недостатками получаемых заготовок являлись: кольцевые незаполнения на наружной и внутренней поверхностях цилиндрической и конической частях высадки, отдельные раковины, продольные риски[41].

Производство бурильных труб диаметром от 73 до 127 мм с толщиной стенки от 9 до 11 мм с внутренней высадкой концов труб на горизонтально-ковочной машине типа АЯКС 800 на ОАО «ПНТЗ» выявило низкую точность размеров высаженных концов и образование значительного продольного облоя. Новая технология предусматривала утолщение концов труб за один проход пуансона на гидравлическом прессе фирмы SMS MEER.

В работе [144] представлена методика и результаты измерения профиля трубной заготовки для технологического процесса формовки листовой заготовки, реализованная на кафедре ТОТП «НИТУ МИСИС». Устройство включает профилегибочную установку фирмы Profilbiegetechnik AG (Швейцария) с возможностью моделирования дискретных процессов формовки труб большого диаметра тремя

способами: U – образной формовкой, формовкой в вальцах и шаговой формовкой. Моделирование процессов непрерывной формовки осуществлялось на специализированном тренажере «ТРЕНАЖЕР ТЭСА».

Эксперименты показали, что заготовка в зоне отставания от рабочего инструмента имеет сложную кривизну профиля. Разработана программа расчета координат и радиусов кривизны поверхности заготовки по фотографиям очага деформации. Получена кривая профиля заготовки с учетом изменения кривизны отрыва от пуансона.

Выводы по первой главе.

1. На основе анализа литературы, отражающей развитие мирового и отечественного практического опыта стационарных и нестационарных процессов обработки давлением в производстве глубокой вытяжкой осесимметричных заготовок, криволинейных трубных заготовок с утолщенными и фланцевыми концами, обозначены направления исследований и разработки технологий получения изделий повышенной точности.

2. Задачи теории обработки давлением не ограничиваются определением с достаточной точностью силовых факторов (усилий для реализации процесса, мощности привода и др.), необходимо обеспечить высокую точность изготавливаемых изделий.

3. Выявлено, что в части объема деформируемой заготовки оказывается невозможным создать пластическую деформацию, зоны упругой деформации могут составлять до 2/3 объема деформируемого тела и не позволяют обеспечить высокую точность размеров изделий. Так для труб переменной толщины целесообразно подвергать пластической деформации только концевые участки, и только эти участки нагревать. Такая деформация может быть локальной: она определена целью процесса.

4. В технологических операциях изгиба деформация является «вынуждено локальной» - так при изгибе заготовки на двух опорах силой

приложенной в центре по ее длине, мы можем обеспечить пластическую деформацию только на $1/3$ ее длины, а на участках $2/3$ – деформация будет упругой и после разгрузки кривизна уменьшится на них до нуля, (точнее – до первоначальной ее величины). Это вынуждает в ряде случаев повторять нагружение многократно, перемещая заготовку между циклами изгиба. В этом случае предложенная машина для изгиба позволяет увеличить длину зоны деформации от $1/3$ до 70% расстояния между опорами. Деформация остается локальной, но область пластической деформации значительно увеличивается, а ее точность также возрастает за счет стабильности изгибающего момента на значительном участке ее длины.

5.Обобщены условия потери устойчивости при вытяжке осесимметричных заготовок в зоне кольцевого участка и в условиях локальной деформации концевых участков труб.

6.Рассмотрен ряд способов и устройств для реализации прогрессивных процессов деформации изгиба листовых и сортовых заготовок, на основании которых необходимо разработать технологии изгиба, обеспечивающие повышение точности заготовок и уменьшение потерь металла.

7.Определены направления создания новых производств, оборудования, реализующие технологии локальной пластической деформации в малой части объема заготовки для получения изделий повышенной точности.

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 для повышения их качества и определить оптимальный, с точки зрения повышения точности размеров заготовок, интервал усилий.

4. На основании теоретических и экспериментальных исследований определить влияние на точность размеров, при локальной деформации 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.

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

2.1. Применение кинематически допустимых полей скоростей для определения усилий деформации

Для определения напряжений и усилий, необходимых для реализации процессов обработки давлением используют современные методы теории пластичности, разработанные советскими, российскими и зарубежными учеными: А.А.Ильюшиным, С.А. Христиановичем, Л.М.Качановым, В.В.Соколовским, Д.Д.Ивлевым, И.А.Кийко, Б.Сен-Венаном, Д. Друккером, А.Надаи, Р.Хиллом, В.Прагером и другими учеными, [79-89].

В работах советских и российских ученых: И.М.Павлова, И.Я. Тарновского, П.И. Полухина, К.Н.Шевченко, А.И.Целикова, Н.Н.Малинина, Е.А.Попова, Г.Я.Гуна, Л.А. Шофмана, В.Н. Выдрина, В.П. Полухина были разработаны методы расчета напряжений и усилий при обработке металлов давлением. Значительные теоретические и экспериментальные исследования проведены учеными Германии Т.Карманом, Л. Прандлем, В. Луэгом, Г. Цоухаром, Англии Р.Хиллом, В.Джонсоном, А.Александром, США А. Надаи и М. Мэнджойном, В. Авицуром, А.Аткинсом и многими другими учеными [9,20,27,89,90,104,105].

В последние годы много ценных работ в изучении процессов обработки давлением выполнены российскими учеными Алюшиным Ю.А., Ашихминым Г.В., Романцевым Б.А., Воронцовым А.Л., Гореликом В.С., Зиновьевым А.В, Коликовым А.П., Колмогоровым В.Л., Коханом Л.С., Кудиновым В.В., Колесниковым А.Г., Мазуром В.Л., Мухиным Ю.А., Никитиным Г.С., Самусевым С.В., Семеновым Б.И., Тереньевым В.Ф., Третьяковым Е.М., Шаталовым Р.Л., Лавриненко В.Ю., Юрковым Г.Ю., и

многими другими учеными [3...6,15-18,25,27,86-90]. 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 ($i = 1, 2, 3$). Зная компоненты вектора скорости, можно определить и тензор скоростей деформации.

Поскольку в данной работе используются в основном цилиндрические координаты, то запишем уравнения равновесия в цилиндрических координатах r, θ, z , где как обычно $r = 0$, центральная ось (в частном случае – ось симметрии), θ – полярный угол, z – ось симметричной заготовки.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0. \end{aligned} \quad (2.1)$$

При осевой симметрии и $\tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = 0$ система (2.1) будет содержать только два уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Эти уравнения равновесия приведены во многих работах по теории пластичности. Уравнения равновесия (2.1) выполняются и при упругой, и при пластической деформации.

Очевидно, что трех уравнений (2.1) для определения шести неизвестных функций ($\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{r\theta}, \tau_{\theta z}, \tau_{rz}$) недостаточно. Для связи напряжений и деформаций в теории упругости обычно используют закон Гука, а при пластических деформациях развиты два основных направления теоретических способов расчета. В деформационной теории, развитой в трудах А.А.Ильюшина, Г.Генки, используют функциональные

зависимости, определяющие связь пластических составляющих тензора деформации с девиатором напряжений

$$\varepsilon_{ij}^{\text{п}} = \varphi \sigma'_{ij} \quad (2.3),$$

где $\varepsilon_{ij}^{\text{п}}$ – часть тензора ε_{ij} , соответствующая пластической деформации, (а упругая ее часть определена законом Гука, как обычно в теории упругости). В формуле (2.3) σ'_{ij} – составляющие девиатора напряжений, 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 , (как известно, тензоры напряжений и деформаций имеют по три независимых инварианта).

Методы решения таких задач приведены в работах А.А.Ильюшина, В.В.Соколовского и других ученых.

Вторая группа теорий пластичности основана на идее, впервые предложенной Б.Сен-Венаном, о том, что компоненты девиатора напряжений определены не компонентами тензора деформаций $\varepsilon_{ij}^{\text{п}}$, а компонентами малых приращений этого тензора $d\varepsilon_{ij}^{\text{п}}$. На основе этой идеи были получены уравнения Леви-Мизеса $d\varepsilon_{ij}^{\text{п}} = \sigma'_{ij} df$, где f – универсальная для данного материала функция, которую обычно принимают зависящей только от второго инварианта тензора σ'_{ij} .

Поскольку приращение $d\varepsilon_{ij}^{\text{п}}$, деленное на малый интервал времени, равно соответствующей компоненте тензора скоростей деформации,

$(\frac{d\varepsilon_{ij}^{\text{п}}}{d\tau} = \dot{\varepsilon}_{ij})$, то определены соотношения между компонентами тензора напряжений и производных тензора скорости деформации по времени, (а не самих деформаций). Поэтому систему уравнений, определяющих скорости деформаций и их связь с напряжениями можно определить в виде

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_r}{\partial r} &= \lambda (2\sigma_r - \sigma_\theta - \sigma_z); \\ \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} &= \lambda (2\sigma_\theta - \sigma_z - \sigma_r); \\ \frac{\partial v_z}{\partial z} &= \lambda (2\sigma_z - \sigma_r - \sigma_\theta); \\ \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_r}{\partial r} &= 6\lambda\tau_{rz}.\end{aligned}\quad (2.4)$$

Система (2.4) определяет связь между шестью компонентами тензора напряжений и тремя компонентами вектора скорости (v_r, v_θ, v_z) , λ - функция координат. При этом упругими деформациями в большинстве задач пренебрегают.

Из уравнений (2.4) видно, (при сложении трех первых уравнений), что условие несжимаемости

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_\theta + \dot{\varepsilon}_z &= 0, \\ \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r}v_r + \frac{\partial v_z}{\partial z} &= 0.\end{aligned}\quad (2.5)$$

выполнено.

В системы уравнений (2.4) и (2.5) входят 6 неизвестных функций: $v_r, v_z, \sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$ и λ , а количество независимых уравнений только 5. Недостающее уравнение - это условие текучести либо это условие Мизеса

$$T_2 = (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6\tau_{rz}^2 = 6k^2, \quad (2.6)$$

где $k = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}$ - предел текучести, (сопротивление деформации) при сдвиге, σ_T - предел текучести при одноосном растяжении-сжатии.

Точное решение этой системы уравнений удастся найти редко: например, в работах В.В. Соколовского, Р. Хилла и других ученых. Часто используют метод построения кинематически допустимых полей скоростей. Такие поля определены условиями:

а) построенное поле скоростей удовлетворяет условию несжимаемости (2.5);

б) поле скоростей определяет положительную величину мощности деформации;

в) поле скоростей удовлетворяет краевым условиям для скоростей, (т.е. на некоторых поверхностях v_r, v_z удовлетворяют некоторым соотношениям

$$f_{\Sigma}(v_r, v_z) = 0 . \quad (2.7)$$

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

Доказано, что если построено кинематически допустимое поле скоростей, то мощность, определяемая этим полем N_k , не может быть меньшей, чем мощность, определяемая точным решением данной задачи, т.е.

$$N_k \geq N . \quad (2.8)$$

С другой стороны, иногда удается построить статически допустимое поле напряжений σ_{ij} . Такое поле должно:

а) удовлетворять уравнениям равновесия (2.1) или (2.2);

б) удовлетворять краевым условиям для напряжений;

в) не нарушать неравенства текучести

$$T_2 = (\sigma_r - \sigma_{\theta})^2 + (\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6 \tau_{rz}^2 \leq 6 k^2 \quad (2.9)$$

Конечно, для точного решения здесь должен иметь место знак равенства в той части объема заготовки, в которой происходит пластическая деформация и возможен знак неравенства $T_2 \leq 6 k^2$ в жестких зонах.

Доказано, что если такое поле напряжений построено, то определяемая им мощность N_c не может превышать величину мощности, определяемую точным решением. Поэтому всегда выполнено условие $N \geq N_c$. А если построены и статически допустимое поле напряжений и кинематически допустимое поле скоростей течения, то мы можем получить двухстороннюю оценку величины мощности N :

$$N_c \leq N \leq N_k \quad (2.10)$$

Обычно, при пластической деформации нижняя граница определена условием $\sigma_n \geq \sigma_T$ (или $\sigma_n \geq 2k$), где σ_n – нормальное напряжение, которое обычно не может быть меньшим, чем σ_T .

Часто построением кинематически допустимого поля скоростей удается определить верхнюю границу величины мощности. Следуя В.Л.Колмогорову можно сформулировать задачу, как определение экстремума функционала

$$J = \iiint \sigma_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \cdot dV + \iint_S \tau_n \Delta V_i dS, \quad (2.11)$$

здесь V_i – скорости течения на контактных поверхностях, где действует напряжение τ_n (величина S – соответствует сумме всех этих поверхностей). Первый член в (2.11) определяет мощность формоизменения. Для идеально-пластических тел, (например, при $\sigma_T = \text{const.}$, возможно существование поверхностей разрыва тангенциальной компоненты скорости V_t).

Обычно, на таких поверхностях $\tau_n = k$ и вместо (2.11) можно записать

$$J = \iiint \sigma_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \cdot dV + \iint_S \tau_n \Delta V_i dS + \int_{S_1} k V_t dS_1 \quad (2.12)$$

При этом учитывается мощность деформации среза и мощность сил трения. Разумеется, возможны разрывы только тангенциальных компонент скорости, 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

$$|\sigma_1 - \sigma_3| = 2k \quad (2.13)$$

Это условие удобно применять в тех случаях, когда из соображений симметрии известны направления главных напряжений, (точная запись (2.13) в произвольных координатах, например, $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{r\theta}, \tau_{rz}$ и $\tau_{\theta z}$, сложна и для расчетов неудобна). Ниже будут использованы оба условия текучести: и Треска-Сен - Венана и Мизеса и показано, что различия в результатах расчетов незначительны.

При упругих деформациях используют закон Гука в виде

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z), \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad (2.14)$$

(остальные компоненты тензоров связаны аналогичными зависимостями).

Здесь E и G – модули упругости первого и второго рода.

Известно, что в гидродинамике используют зависимости касательных напряжений не от деформаций, а от скорости деформаций, т.е. функции вида

$$\tau_{xy} = \mu \dot{\gamma}_{xy}, \quad (2.15)$$

где μ - коэффициент вязкости; $\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial \tau}$ - компонента тензора скорости деформации, τ - время, (аналогично $\dot{\varepsilon}_x = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial \tau}$ и для других компонент тензора).

При пластической деформации линейные зависимости (2.15) не выполняются. Часто удобно разделить тензора напряжений и деформаций на два вида тензоров: это шаровой тензор, равный

$$T_1 = \begin{vmatrix} \sigma_c & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_c & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_c \end{vmatrix},$$

где $\sigma_c = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ - среднее напряжение и девиатор

$$T_2 = \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_c & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_c & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_c \end{vmatrix}$$

Всестороннее растяжение или сжатие, (при $T_2 = 0$), для многих металлов и сплавов не приводит к появлению пластических деформаций, поэтому принимают, что тензоры T_1 для напряжений и деформаций связаны линейной зависимостью:

$$\sigma_c = 3 K \varepsilon_c, \quad (2.16)$$

где $K = \frac{1-2\nu}{E}$; $\varepsilon_c = \frac{1}{3}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$, K - называют модулем объемной деформации, (см. монографию А.А.Ильюшина[80], стр. 50).

Теории А.А.Ильюшина и Г.Генки приводят к уравнениям типа

$$\sigma_x = \sigma_c + \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i}(\varepsilon_x - \varepsilon_c), \quad \tau_{xy} = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \gamma_{xy}, \quad (2.17)$$

(для остальных компонент тензоров уравнения аналогичны).

В уравнении (2.17) σ_i и ε_i интенсивности тензоров напряжений и деформаций - величины пропорциональные их вторым инвариантам.

Разумеется, уравнения (2.17) можно использовать только при нагрузке; если же происходит разгрузка, то пластические деформации равны нулю, (при разгрузке имеют место только упругие деформации).

Система (2.17) основана на том, что главные оси девиаторов напряжений и деформаций соосны, (А.А.Ильюшин ввел понятие о направляющих тензоров и показал, что направляющие тензоров и деформаций совпадают, [80, стр. 97]). Можно записать уравнения (2.10) в виде

$$\frac{\sigma_x - \sigma_c}{\varepsilon_x - \varepsilon_c} = \frac{\sigma_y - \sigma_c}{\varepsilon_y - \varepsilon_c} = \frac{\sigma_z - \sigma_c}{\varepsilon_z - \varepsilon_c} = \frac{2\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{2\tau_{xz}}{\gamma_{xz}} = \frac{2\tau_{yz}}{\gamma_{yz}}. \quad (2.18)$$

Деформационная теория дает удовлетворительные результаты при анализе многих процессов т.н. «простого нагружения», когда все компоненты девиатора напряжений возрастают пропорционально одному параметру, например, времени. Если же процесс нагружения является более сложным, например, кручение трубы сменилось ее растяжением или сжатием, когда происходит резкий поворот главных напряжений, деформационная теория может привести к неправильным результатам.

Это можно иллюстрировать рис.2.1, где показаны напряжение σ_1 и деформация (пунктиром) ε_1 , рис.2.1а. Затем, мы осуществляем разгрузку и далее повторную нагрузку – рис.2.1б, но уже напряжением σ_2 , которое существенно отличается от σ_1 по направлению.

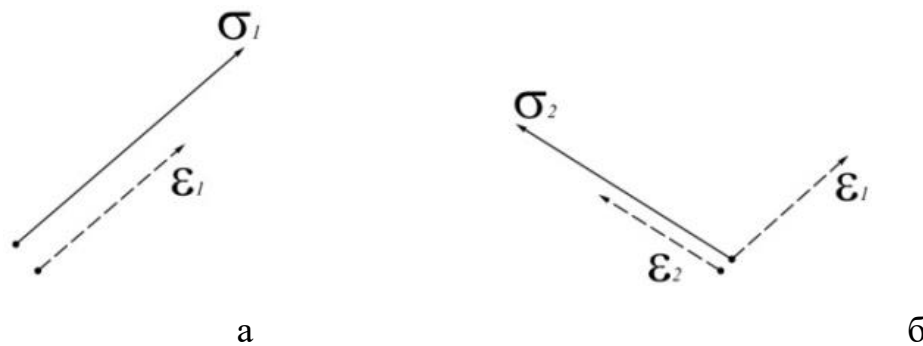


Рисунок 2.1. - Схема изменения напряжений и деформаций при изменении напряженного состояния (согласно деформационной теории)

Согласно деформационной теории напряжению σ_2 должна соответствовать деформация ε_2 . Но пластическая деформация ε_1 не может «исчезнуть», в процессе разгрузки изменение пластической деформации невозможно. Объяснить изменение деформаций, связанное с исчезновением величины ε_1 нельзя. Как указывал Р.Хилл «это означает, что пластическая деформация изменяется сама по себе в течение разгрузки и повторной нагрузки, что является абсурдным», [27], стр.63.

От этих недостатков свободна т.н. «теория течения», согласно которой соосным с девиатором напряжений является не тензор деформаций, а

тензор приращений деформаций $d\varepsilon_{ij}$ (т.е. $d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, d\varepsilon_z, d\gamma_{xy}, d\gamma_{xz}, d\gamma_{yz}$ - в декартовых координатах).

Вместо уравнений (2.18) теория течения требует использовать уравнения

$$\frac{\sigma_x - \sigma_c}{d\varepsilon_x} = \frac{\sigma_y - \sigma_c}{d\varepsilon_y} = \frac{\sigma_z - \sigma_c}{d\varepsilon_z} = \frac{2\tau_{xy}}{d\gamma_{xz}} = \frac{2\tau_{yz}}{d\gamma_{yz}} \quad (2.19)$$

или, следуя [27], можно записать

$$d\varepsilon_{ij} = (\sigma_{ij} - \sigma_c)df, \quad (2.20)$$

где df - скалярный коэффициент пропорциональности.

В рамках этой теории схема по рисунку 2.1 существенно изменяется, что иллюстрирует схема, приведенная на рисунке 2.2.

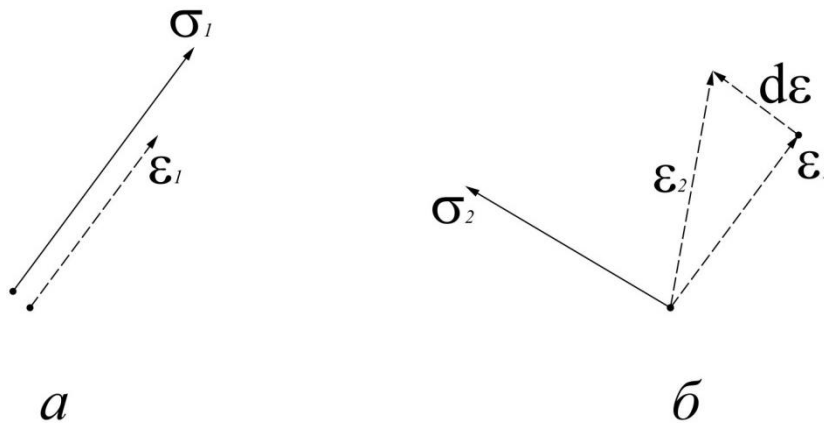


Рисунок 2.2 - Схема изменения напряжений и деформаций при изменении напряженного состояния, (согласно теории течения)

После реализации деформации ε_1 под действием напряжения σ_1 , рис.2.2а происходит разгрузка, но при этом деформация ε_1 не «исчезает». Последующая нагрузка напряжением σ_2 , рис. 2.2б, создает приращение деформации, соответствующее вектору $d\varepsilon$, поэтому суммарная деформация соответствует уже вектору ε_2 , (который, в отличие от схемы по рис. 2.1 не совпадает с направлением вектора σ_2 . При точной постановке задачи следовало бы определять накопление (возрастание) деформации, определяя величины $d\varepsilon_{ij}$ на каждом этапе нагружения, и суммируя их). Процесс пластической деформации не определяется

величинами напряжений в данный момент времени. В отличие от упругой деформации, (когда деформации определены напряжениями, действующими в данный момент времени), при пластической деформации величины $\varepsilon_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ зависят от всей «истории процесса нагружения», (начиная с момента, когда в какой-либо точке деформируемого тела после упругой начнется пластическая деформация).

Для схемы по рис. 2.2 на деформацию оказывают влияние и напряжение σ_1 , и напряжение σ_2 . На рис. 2.3 показана для иллюстрации еще одна схема изменения напряженного состояния.

Сначала при воздействии напряжения σ_1 достигнута деформация ε_1 .

Затем напряжение возросло до величины σ_2 , но его направление не изменилось, поэтому деформация возросла до ε_2 , (параллельной напряжению σ_2). Далее напряжение изменили, и оно стало соответствовать вектору σ_3 , а потом σ_4 . При этом, как показано на рис. 2.3 деформация получит приращения, параллельные векторам σ_3 и σ_4 , а результирующая деформация будет соответствовать вектору ε_4 .

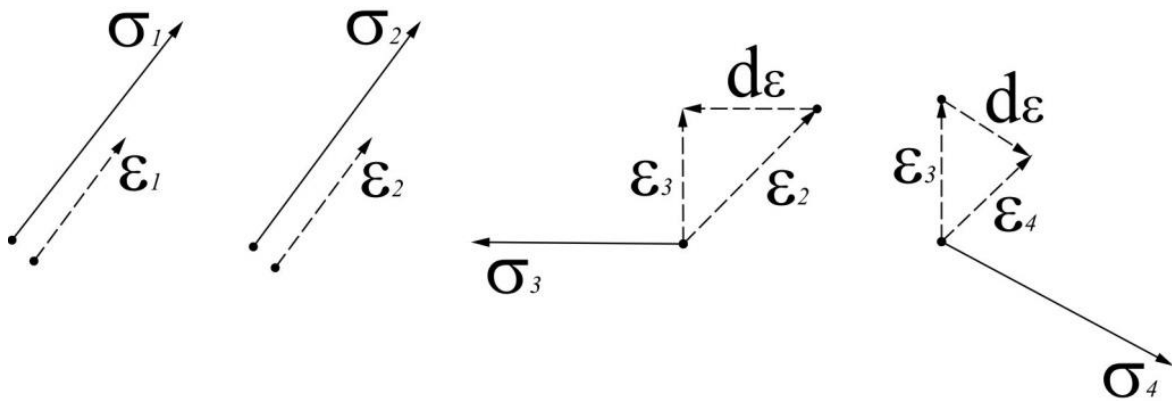


Рисунок 2.3 – Схема изменения деформации при последовательном изменении нагрузки $\sigma_1 \rightarrow \sigma_2 \rightarrow \sigma_3 \rightarrow \sigma_4$

В отличие от соотношений (2.20) теория А.А.Ильюшина, Г.Генки соответствует уравнению

$$\varepsilon_{ij} = (\sigma_{ij} - \sigma_c)df,$$

и при пропорциональном (простом) нагружении обе теории дают близкие результаты.

В ряде работ показано значение постулата Друкера [20], согласно которому, если осуществлен замкнутый цикл нагрузки и разгрузки любого тела и в этом цикле реализуется пластическая деформация, то работа приложенных сил на создаваемых ими перемещениях, должна быть положительной. При однородном напряженном состоянии можно записать

$$\oint \sigma_{ij}d\varepsilon_{ij} \geq 0,$$

Знак равенства соответствует упругой деформации.

Показано [20], что если обозначить пластическую деформацию $d\varepsilon_{pij}$, то можно записать

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0)d\varepsilon_{pij} \geq 0, \quad (2.21)$$

где σ_{ij}^0 - система остаточных напряжений.

Условие (2.21) называют основным неравенством пластичности ([20]стр.17) и можно показать, что из него следует, что поверхность пластичности должна быть выпуклой, а вектор приращения пластической деформации должен быть ортогональным к этой поверхности. Из этого постулата можно при определенных допущениях получить соотношения (2.19) и (2.20).

Известны также уравнения Прандля - Рейса, в которых учтены и пластические и упругие деформации, но они весьма сложные и известны их решения только для простейших задач. Для большинства задач теории обработки металлов давлением пластические деформации значительно больше упругих и последними можно пренебречь.

В дальнейших расчетах используются уравнения теории течения с учетом только пластических деформаций.

Предел текучести при одноосном растяжении – сжатии σ_T или сдвиге k принят в зоне деформации постоянным и равным некоторой усредненной величине. При этом используется модель идеального жесткопластического тела без упрочнения.

2.2. Современные методы расчета точности заготовок в процессах обработки металлов давлением

Иногда простое поле скоростей, состоящее из жестких зон, дает приемлемую оценку величин усилий. Для примера на рисунке 2.4 приведено поле скоростей при деформации вытяжки плоской заготовки.

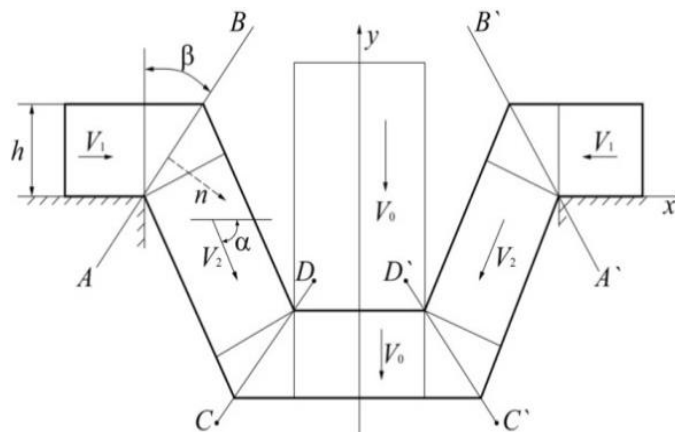


Рисунок 2.4 – Схема кинематически допустимого поля скоростей при плоской деформации

Часть заготовки левее плоскости АВ движется, как жесткое тело, в направлении оси x со скоростью v_1 , а правее плоскости АВ со скоростью v_2 , вектор которой составляет угол α с осью x . Плоскость CD отделяет эту

зону от жесткой зоны, расположенной под пуансоном и имеющей ту же скорость v_0 , что и пуансон. Скорость v_0 совпадает по направлению с осью «у», (и противоположна ей).

Аналогичное поле скоростей имеет, место ввиду симметрии, и справа от оси «у».

Всего имеется 5 жестких зон и поле будет кинематически допустимым, если равны нормальные компоненты скорости на плоскостях АВ и CD, а также А'В' и С'Д'. Первое условие всегда выполнено при $\beta = \frac{\alpha}{2}$, $v_1 = v_2$, а второе, рис. 2.5, требует, чтобы имело место соотношение $v_0 \cos(90^\circ - \frac{\alpha}{2}) = v_1 \cos \frac{\alpha}{2}$, т.е. $v_2 = v_1 = v_0 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$, рис. 2.5а.

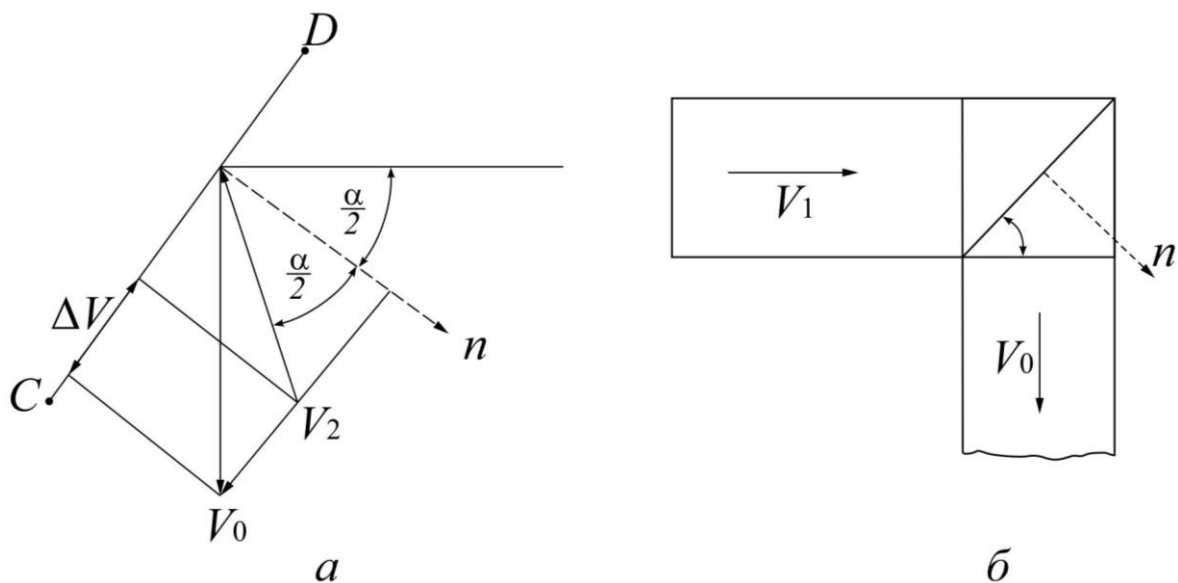


Рисунок 2.5 - Схема поля скоростей для плоской деформации CD – границе двух жестких зон: а – при $\alpha < 90^\circ$, б – при $\alpha = 90^\circ$

Разрывы тангенциальных компонент скоростей на плоскости АВ равны

$$\Delta v = 2v_1 \sin \frac{\alpha}{2} = 2v_0 \frac{\sin \frac{2\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}},$$

а на плоскости CD

$$\Delta v = \frac{v_0 \cos \alpha}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}.$$

Длины граничных участков вдоль АВ и CD равны $\frac{h}{\cos \frac{\alpha}{2}}$, поэтому полная мощность (с учетом плоскостей А'В' и С'D' рис. 2.4):

$$N = \frac{2khv_0}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} (2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \cos \alpha) = \frac{2khv_0}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} = P v_0$$

Верхняя граница усилия (на единицу ширины заготовки) равна

$$P = \frac{2kh}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} \quad (2.22)$$

Если на опорной плоскости, (вдоль оси x) имеет место трение с коэффициентом трения μ , то его мощность равна $P \mu v_1 = P \mu v_0 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$, а полная мощность

$$N = P v_0 = \frac{2k v_0}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} + P \mu v_0 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

$$P = \frac{2kh}{\cos^2 \frac{\alpha}{2} (1 - \mu \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2})} \quad (2.23)$$

Например, при $\alpha = 90^\circ$, $\sigma_T = 300 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, $k = 173,2 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, $h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\mu = 0,1$;

$$P = \frac{2 \cdot 173,2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 0,9} = 3,85 \text{ МН}$$

Рассмотрим случай осесимметричной деформации при вытяжке с выдавливанием цилиндрического стакана, рис. 2.6.

Пуансон радиусом R_1 при движении вниз со скоростью v_0 , осуществляет вытяжку цилиндрического стакана внутренним диаметром $2R_1$ толщиной h . Естественной является попытка построить такое кинематически допустимое поле скоростей, которое, по аналогии со схемой рис. 2.4, состояло бы из двух зон, одна из которых движется совместно с пуансоном, как жесткое тело со скоростью v_0 , а во второй зоне имело бы место радиальное течение, (когда $v_z = 0$, $v_r \neq 0$). Эта задача была решена в работе [116].

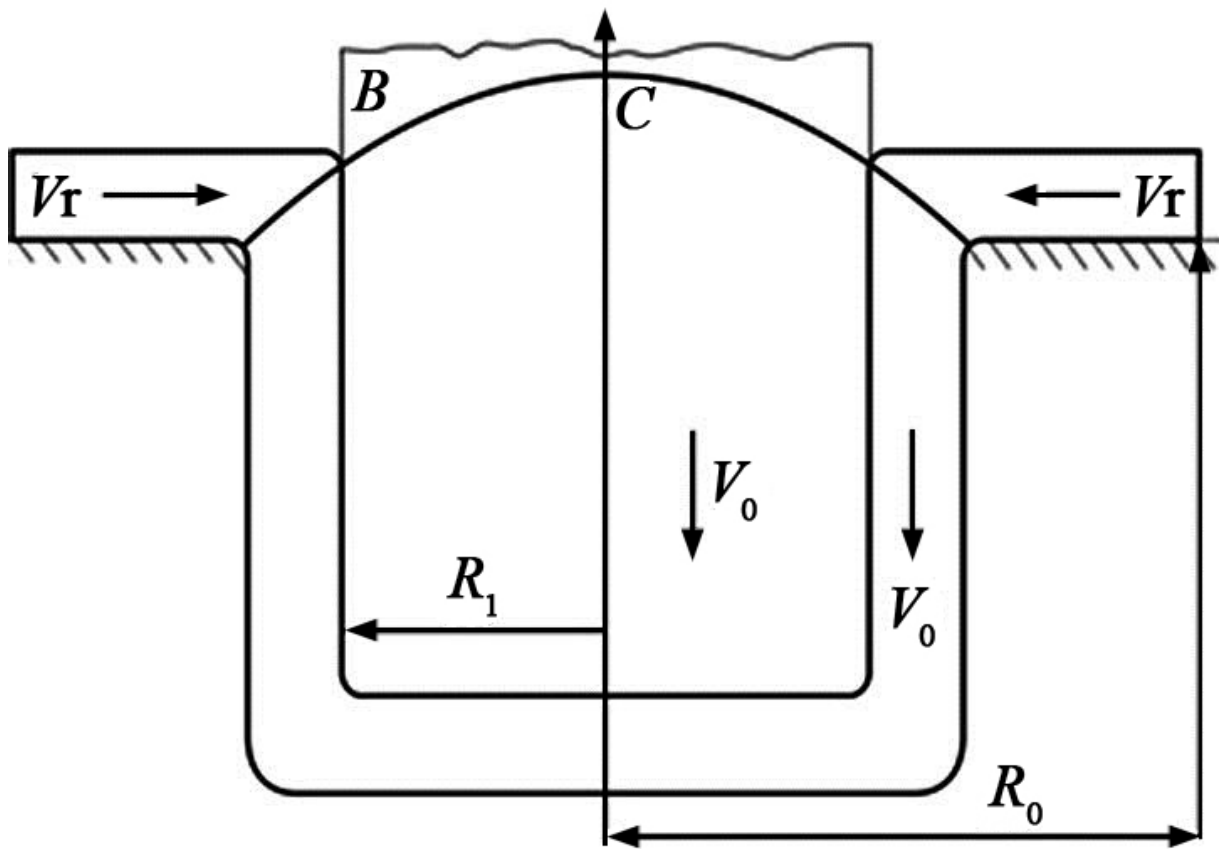


Рисунок 2.6.- Схема кинематически допустимого поля скоростей при осесимметричной деформации вытяжки цилиндрического стакана

Было показано, что в осесимметричной задаче, в отличие от условий плоской деформации, скорость v_r не может быть постоянной.

Поскольку радиус каждой точки при движении к оси z уменьшается, то реализуется деформация сжатия и при $v_z = 0$ условие несжимаемости определяет поле скоростей $v_r = \frac{C_1}{r}, v_\theta = 0, v_z = 0$, где C_1 - постоянная.

Цилиндрическая часть заготовки движется совместно с пуансоном, как жесткое тело, вдоль оси z со скоростью $v_z = v_0 = const. (v_\theta = v_r = 0)$.

Такое поле возможно только в том случае, когда существует некоторая поверхность ABC , на которой нормальная компонента скорости

непрерывна. Как показано на рис. 2.6 и 2.7 в любой точке поверхности АВ проекции на нормаль «n» (показанную пунктиром на рис. 2.7) скоростей обеих зон должны быть равны. Если такая поверхность существует, то данное поле скоростей может быть кинематически допустимым. Это условие, рис. 2.7, имеет вид:

$$v_r \cos(90 - \alpha) = v_z \cos \alpha \text{ или } \frac{C_1}{r} \sin \alpha = v_0 \cos \alpha, \operatorname{tg} \alpha = \frac{dz}{dr} = \frac{v_0 r}{C_1}$$

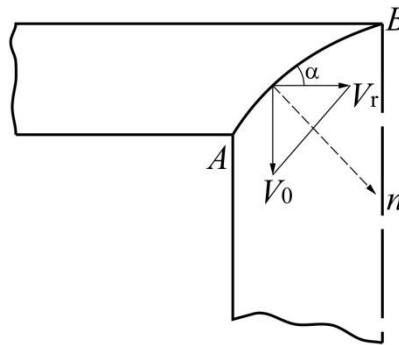


Рисунок 2.7 – Схема определения
границной поверхности двух зон деформации

Уравнение граничной поверхности

$$Z = \frac{v_0}{C_1} \int r dr = C_2 + \frac{v_0}{2C_1} r^2,$$

а с учетом того, что при $r=R_1, z=h$, а при $r=R_1+h, z=0$ получим

$$C_2 = \frac{v_0}{2C_1} (R_1 + h)^2; C_1 = -v_0(R_1 + 0,5h)$$

и уравнение граничной поверхности

$$Z(r) = \frac{1}{2R_1 + h} [(R_1 + h)^2 - r^2]$$

Следовательно, такая поверхность, на которой равны нормальные компоненты скорости, существует – это параболоид вращения и поле является кинематически допустимым.

В зоне левее АВ компоненты скорости деформации при

$$v_r = -\frac{v_0(R_1+0,5h)}{r}; \varepsilon_r = -\varepsilon_\theta = \frac{2v_0}{r^2}(R_1+0,5h), \text{ а}$$

мощность формоизменения [115]

$$N_1 = 4\pi k v_0 R_1 h \ln \frac{R_0}{R_1}$$

Надо учесть мощность среза N_2 на границе параболоида, где разрыв тангенциальной компоненты скорости равен

$$\Delta v = v_r \cos \alpha + v_0 \sin \alpha = (v_r + v_0 \operatorname{tg} \alpha) \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

$$\text{или } \Delta v = \left[-\frac{v_0(R_1+0,5h)}{r} + v_0 \frac{dz}{dr} \right] \left[1 + \left(\frac{dz}{dr} \right)^2 \right]^{-1}, \text{ а } \frac{dz}{dr} = -\frac{r}{R_1+0,5h}.$$

В результате расчетов определяем

$$N_2 = \int_{R_1}^{A_1+h} 2\pi r k \Delta v \left[1 + \left(\frac{dz}{dr} \right)^2 \right] dr = 2\pi k v_0 R_1 h \left(1 + \frac{h}{2R_1} \right)$$

и приравняв полную мощность $N_1 + N_2 = P v_0$ определим усилие P [116,117]

$$P = 2\pi k R_1 h \left(1 + 2 \ln \frac{R_0}{R_1} \right) \quad (2.24)$$

Если учесть мощность трения на контактной поверхности, то при коэффициенте трения μ и мощности трения $\mu P v_0$ получим

$$P = \frac{2\pi k R_1 h}{1-\mu} \left(1 + 2 \ln \frac{R_0}{R_1} \right) \quad (2.25)$$

Например, если $\sigma_T = 350 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, $k = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} = 202 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, $\mu = 0,1$;

$R_0 = 0,08\text{м}$, $h = 2 \cdot 10^{-3}\text{м}$, то по формуле (2.25) получим

$$P = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 202 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0,9} (1 + 2 \ln 1,6) = 0,27 \text{МН}.$$

Иногда при анализе процессов обработки металлов давлением используют простые поля скоростей, рассмотренные выше.

Примеры приведены в монографии В.Авицура [98], ряд кинематически допустимых полей скоростей с граничными линиями в виде прямых и дуг окружности рассмотрен Ю.А.Алюшиным, С.А.Еленевым, решившими ряд важных задач [105]. Общие принципы вариационных методов и их

применения в теории пластичности изучены Бердичевским В.Л., Васидзу К., Авицуром В., [107-110], а еще раньше, (в 1947 году), А.А.Марковым [114]. С использованием кинематически допустимых полей скоростей Д.Дурбан рассмотрел задачи о волочении и прессовании жестко-пластических тел с упрочнением [110], а С.Саманта задачу о сжатии заготовок в форме круглого диска и многоугольника [111].

Задачи об изгибе заготовок рассмотрены фактически с построением статически допустимых решений: задачу изучают в напряжениях с использованием принятой зависимости между кривизной заготовки и изгибающим моментом. Однако эти задачи имеют такую особенность, что при рассмотрении задачи в напряжениях используют одно важное допущение, (которое ввел в практику Д.Бернулли) – о линейном распределении деформаций, (и скоростей деформаций), по толщине изгибаемой полосы. Если в заготовке простого сечения, например, прямоугольного), ось x направлена по длине заготовки, то деформация $\varepsilon_x = yK$, где K - кривизна оси заготовки. Это допущение использовал Б.Сен-Венен при рассмотрении пластической деформации изгиба [79], а позднее его применяли почти все специалисты, изучавшие деформацию изгиба. Следует сказать, что для длинных заготовок, (у которых длина в 7-8 и более, раз превышает размеры сечения), это допущение выполняется удовлетворительно. На его основе определяют приближенно напряжения: $\sigma = \pm \sigma_T$ - в зонах пластической деформации. Это определяет связь кривизны с изгибающим моментом и дает дифференциальное уравнение второго порядка для функции прогиба $v(x)$, поскольку кривизна равна

$$K(x) = \frac{d^2v}{dx^2} \left[1 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right]^{-1,5} \quad (2.26)$$

Обычно величиной $\left(\frac{dv}{dx} \right)^2$ пренебрегают ввиду ее малости и получают линейное дифференциальное уравнение второго порядка.

Подобное рассмотрение упруго пластического изгиба выполнено В.Н. Шинкиным [49, 70,72,73,74].

В процессе изгиба заготовки, установленной на двух опорах, давлением ролика или пуансона изгибающий момент и кривизна равны нулю в опорных сечениях (здесь пластические деформации равны нулю, а имеют место только упругие деформации).

Изменить деформацию изгибом в этих зонах невозможно и после разгрузки она остается такой же, какой была до деформации.

При пластической деформации кривизна изменяется от нуля до максимальной величины. Длина зоны, в которой возможно создать пластическую деформацию и тем самым изменить кривизну, не может быть менее $\frac{2}{3}$ общей длины заготовки, точность кривизны весьма низкая: она изменяется от нуля до максимума. Следовательно, существующие машины для изгиба заготовок обеспечивают только низкую точность величины кривизны ее оси, а поэтому поиск конструкций новых устройств для изгиба заготовок с более высокой точностью является весьма актуальным.

В настоящее время производят расчеты не только напряжений, деформаций, усилий и мощности, необходимых для реализации процесса обработки металлов давлением, но и возможные отклонения этих параметров от номинальных величин, полученных при расчетах, [7,63, 117].

Для технологов и для конструкторов, проектирующих оборудование для реализации процессов обработки давлением, представляет интерес не только определение некоторого параметра, например усилия P , необходимого для вытяжки из листа толщиной h в форме круга радиусом R_0 заготовки радиусом R_1 и длиной приближенно равной $l = R_0 - R_1$. Важно знать, какие возможны отклонения этого параметра от полученной расчетной величины.

Если мы определим, что усилие деформации равно 250 кН, то для технолога и конструктора важно знать, какова точность этой величины, какие возможны отклонения от нее, то есть, следует ли понимать эту величину как диапазон чисел: 250 ± 10 кН или 250 ± 100 кН.

Вопрос заключается в том, что если определена величина усилия P_0 , то каковы возможные отклонения этого параметра от номинальной величины, т.е. диапазон: $P = P_0 \pm \Delta P$.

Следует отметить, что аргументы функции $P(k, R_1, R_0, h, \mu)$ всегда известны только с некоторой степенью неопределенности, т.е. $k \pm \Delta k, R_1 \pm \Delta R_1, R_0 \pm \Delta R_0, h \pm \Delta h, \mu \pm \Delta \mu$, ни один из них нельзя считать определенным (точным) числом.

Если ранее в процессах обработки давлением определяли только энергосиловые параметры, например усилия, мощность, необходимые для реализации процесса и т.д., то позднее была предложена методика расчета возможных колебаний величины усилия прокатки при отклонениях технологических параметров от их номинальных величин [63]. Эти методы и расчетные формулы были также изложены в [118]. Они представляют интерес, поскольку отклонение параметров от их номинальных величин приводят к отклонениям также величин усилий.

Кроме того, в теории пластичности обычно при выполнении расчетов делают определенные допущения, например:

1. Принимается схема идеальной пластичности, т.е. $k = const, \sigma_T = const$.

Упрочнение учитывается только за счет усреднения величины " k " (или σ_T).

2. Упругими деформациями пренебрегают, т.е. материал полагают жесткопластическим и обычно используют условие несжимаемости.

3. Все краевые условия также известны с погрешностями, в частности, из-за искривления границ и ввиду погрешностей величин скоростей и напряжений.

Например, при вытяжке цилиндрического стакана радиусом R_1 из диска радиусом R_0 и толщиной h , все эти величины, определяющие размеры заготовки, известны только с некоторыми отклонениями: $R_1 \pm \Delta R_1, R_0 \pm \Delta R_0, h \pm \Delta h$. Вопрос о том, какое именно влияние могут оказать эти погрешности на усилие, представляется весьма важным [148].

То, что такие возможные отклонения не учитывают, может привести к случаям, когда технолог полагает, что усилие равно 50 кН, а фактически оно оказывается равным 60 кН и при изготовлении цилиндрических стаканов может иметь место получение некачественных изделий. Иногда полагают, что величины указанных отклонений: $\Delta R_1, \Delta R_0, \Delta h$ и т.д. являются «погрешностями», т.е. предполагают, что существуют некоторые точные величины, определяемые числами R_1, R_0, h , но измерить их точно мы не можем, и только поэтому они известны с некоторой погрешностью (а величины $\Delta R_1, \Delta R_0, \Delta h$ и т.д. определены именно этими погрешностями). Разумеется, погрешности измерений имеют место, но колебания величин аргументов возникают не только из-за этого. Основной причиной является то, что сами параметры процесса, в данном случае R_1, R_0, h изменяются по объему, изменяются радиусы и толщина заготовки.

Неопределенность размеров заготовки и также предела текучести являются реальными фактами, и эти величины не являются точно определенными в некоторых интервалах, причем, как было показано в [7,63], реально существуют «интервалы равной вероятности», в пределах которых все числа являются равноценными. С точки зрения математики если задано некоторое уравнение, в которое входит параметр $R_1 = 20,000$ мм, то решение, полученное для некоторой функции, характеризующей изменение R_1 в диапазоне $R_1 = 20,000 \div 20,001$ мм, решением не является.

Однако, в реальных задачах такое решение приемлемо, поскольку диапазон возможных изменений R_1 намного превосходит интервал 0,001 мм.

Если аргументы некоторой функции, в данном случае R_1, R_0, h имеют малые отклонения $\Delta R_1, \Delta R_0, \Delta h$ от номинальных величин, то отклонение функции можно определить по формулам дифференциального исчисления, в частности ее приращение:

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial f}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h, \quad (2.27)$$

где $\frac{\partial f}{\partial R_0}, \frac{\partial f}{\partial R_1}, \frac{\partial f}{\partial h}$ - частные производные функции $f(R_1, R_0, h)$.

В общем случае, если функция f зависит от «n» аргументов $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$, то

$$\Delta f = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i. \quad (2.28)$$

Такие расчеты были выполнены для процесса прокатки в [7,63]. Однако часто устойчивость процесса определена некоторым диапазоном изменения его параметров. Например, Л.А.Шофман показал [16], что процесс вытяжки является устойчивым только в диапазоне изменения функции f , который определен условием

$$f = \frac{R_0 - R_1}{h} < 44, \quad (2.29)$$

где R_0 – радиус круглой (имеющей форму диска), исходной заготовки, R_1 – радиус тонкостенного стакана толщиной h .

Нарушение неравенства (2.29) приводит к возникновению складок, т.е. к потере устойчивости процесса деформации и неопределенным изменениям конфигурации деформируемого тела.

Из формулы (2.29) можно определить производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial R_0} &= \frac{1}{h} = f \frac{1}{R_0 - R_1}; \\ \frac{\partial f}{\partial R_1} &= -\frac{1}{h} = -f \frac{1}{R_0 - R_1}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial f}{\partial h} = - \frac{R_0 - R_1}{h^2} = - \frac{f}{h}$$

и поэтому можно определить приращение функции f по формуле

$$\Delta f = \frac{f \Delta R_0}{R_0 - R_1} - \frac{f \Delta R_1}{R_0 - R_1} - \frac{f}{h} \Delta h. \quad (2.30)$$

Как показано ниже, в ряде случаев, когда малые приращения аргументов приводят к весьма значительным приращениям функции, использовать зависимость (2.30) нельзя, - приращения функции могут значительно отличаться от ее дифференциала. В этих случаях следует использовать формулы для конечных приращений, определяя значения разностей $[f(R_{01}) - f(R_{02})]$, $[f(R_{11}) - f(R_{12})]$, $[f(h_1) - f(h_2)]$.

Приведенная выше методика, однако, не учитывает возможной нестационарности процесса. Поэтому эти методы применимы к стационарным процессам, например, для прокатки или волочения, (хотя и при прокатке возможны нестационарные процессы, например, в начале прокатки или при ее завершении, при колебаниях температуры, натяжений, других факторов, но при прокатке нестационарные процессы не играют столь существенной роли, как при изгибе или вытяжке).

Однако, в нестационарных процессах, например, таких как вытяжка, изгиб, степень точности размеров заготовки и возможные колебания размеров заготовки могут существенно изменяться в процессах деформации.

Так при вытяжке в начале процесса искажения размеров, их колебания невелики, но по мере увеличения деформации они возрастают и могут увеличиться на столько, что на заготовке возникают «волны» - выступы и углубления размерами до 8-15 мм, что приводит к дефектам заготовок. При изгибе зависимость точности от параметров изгиба и времени носит более сложный характер: величины погрешности могут быть значительными в начале процесса, затем уменьшиться, а далее – вновь возрасти, как показано ниже. Можно выразить переменные f, R_0, h и

другие, как функции времени, но это неудобно, поскольку время само по себе оказывает на эти процессы незначительное влияние. Лучше использовать характеристики деформации, или связанные с ними, нагрузки.

При вытяжке, по мере увеличения длины стакана уменьшается отношение $\left(\frac{R_0}{R_1}\right)$ возрастает общая степень деформации и уменьшается точность размеров, в начале процесса незначительно, а после достижения некоторых величин отклонения размеров быстро возрастают.

Выводы по главе 2:

1. В данной работе использована система уравнений теории течения при зависимостях, связывающих напряжения с тензором скоростей деформации.

2. В ряде задач, например, в условиях осевой симметрии, удается найти простые решения системы уравнений (2.4) – (2.6).

3. Для решения задач далее используется метод построения кинематически допустимых полей скоростей течения и определены верхние границы величин мощности деформации.

В случаях, когда имеется однозначная зависимость мощности от усилия деформации, это дает возможность определить также и верхнюю оценку усилия деформации.

ГЛАВА 3. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

3.1. Определение напряжений при вытяжке

Схема деформации вытяжки из плоских листов показана на рис.3.1. Ввиду малой толщины листовой заготовки сделаем, как обычно, допущения $\tau_{rz} = 0, \sigma_z = 0$ и получим систему уравнений при условии текучести Мизеса.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0;$$

$$\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r \sigma_\theta = 3k^2 \quad (3.1)$$

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

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2k \quad (3.2)$$

Очевидно, что имеет место краевое условие $\sigma_r = 0$; при $r = R_0$ (3.2), где R_0 – радиус боковой поверхности листовой заготовки.

Если использовать условия Треска, то подставив (3.2) в первое уравнение (3.1) получим $\sigma_r = 2k \ln \frac{R_0}{r}$;

$$\sigma_\theta = 2k \left(\ln \frac{R_0}{r} - 1 \right) \quad (3.3).$$

На наружном контуре заготовки компонента тензора напряжений $\sigma_r = 0$, а $\sigma_\theta = -2k$. По модулю величина σ_θ максимальна на наружном контуре заготовки при $r = R_0$. 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). Компонента тензора σ_θ отрицательна и убывает (по модулю) от $\sigma_\theta = -2k$ при $r = R_0$ до $\sigma_\theta = -2k(1 - \ln \frac{R_0}{R_1})$, при $\sigma_\theta = 0$. Если использовать в аналогичных расчетах условие Мизеса, то компонента напряжения σ_θ равна $\sigma_\theta = 0,5[\sigma_r \pm \sqrt{3(4k^2 - \sigma_r^2)}]$ и уравнение равновесия примет вид $\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{0,5}{r}(\sigma_r + \sqrt{3}\sqrt{4k^2 - \sigma_r^2}) = 0$. В результате интегрирования при краевом условии $\sigma_r = 0$, при $r = R_0$ получим:

$$\ln \frac{R_0}{r} = \frac{\sqrt{3}}{2} \arcsin \left(\frac{\sigma_r}{2k} \right) + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\sigma_r + \sqrt{3}\sqrt{4k^2 - \sigma_r^2}}{2k\sqrt{3}} \right| \quad (3.4)$$

Из (3.4) следует, что при $r = R_0$, $\sigma_r = 0$, и при этом $\sigma_\theta = -k\sqrt{3}$, а если $\frac{R_0}{R_1} = 2,49$, то $\sigma_\theta = 0$ и $\sigma_r = k\sqrt{3}$ и получим $\ln \frac{R_0}{r} = 0,906$; а при $r = R_1$; $\sigma_r = k\sqrt{3}$, $\sigma_\theta = 0$ и предельная степень вытяжки определена соотношением $\frac{R_0}{R_1} = 2,48$, (а не 2,72), как при условии текучести Треска.

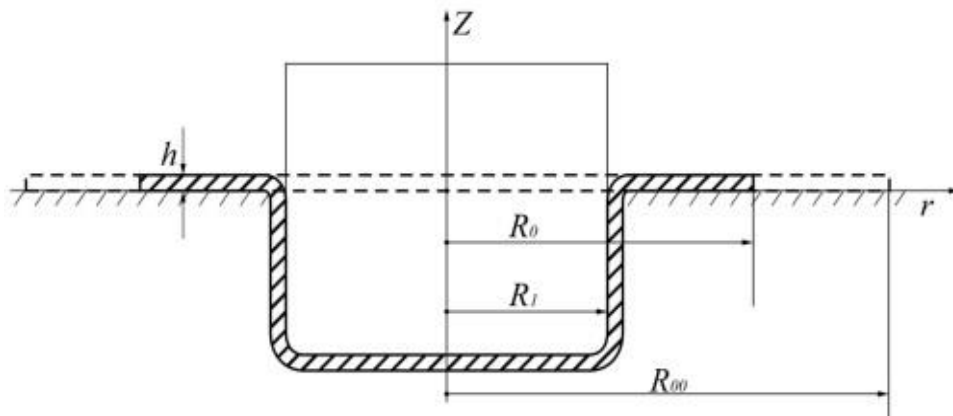


Рисунок 3.1 – Схема деформации при вытяжке стакана

На рис. 3.2 приведены графики изменения напряжений при высадке цилиндрических стаканов.

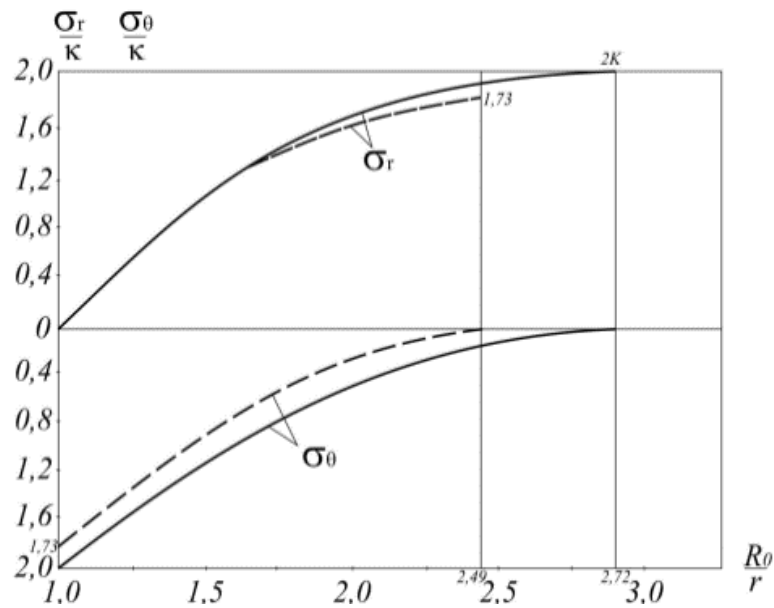


Рисунок 3.2 – Графики функций, характеризующих изменение напряжений $\frac{\sigma_r}{k} \left(\frac{R_0}{r} \right)$ и $\frac{\sigma_\theta}{k} \left(\frac{R_0}{r} \right)$: сплошные линии – с применением условия текучести Треска-Сен-Венана, пунктирные – с применением условия Мизеса

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 (приближенно – внутренний радиус стакана): R_1 (м); толщина деформируемого листа h (м). Из этих величин можно составить ряд безразмерных параметров: $A_1 = \frac{P}{kR_1h}$; $A_2 = \frac{R_0}{R_1}$; $A_3 = \frac{R_1}{h}$. 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

$$f(A_1, A_2, A_3) = 0 \quad (3.5)$$

Введя для удобства в параметр A_1 безразмерный множитель 2π , (когда $A_1 = \frac{P}{2\pi R_1 kh}$), соотношение относительно A_1 , получаем вид возможной формулы: $A_1 = f(A_2, A_3)$ или

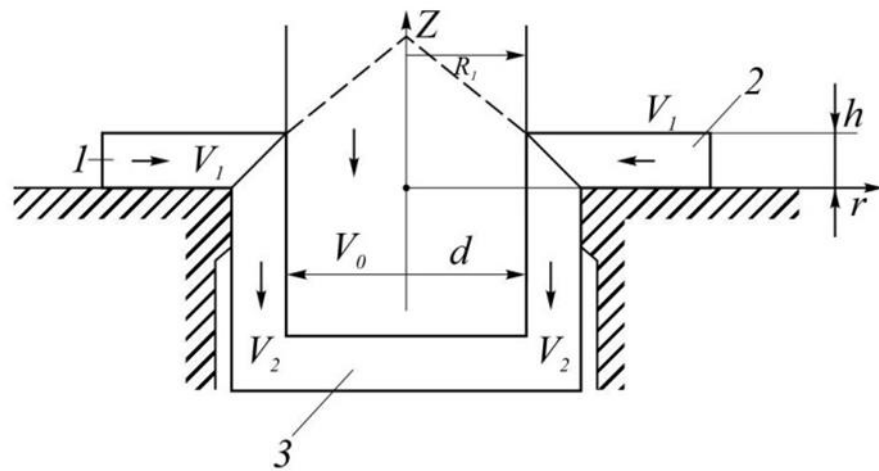
$$P = 2\pi R_1 h k f\left(\frac{R_0}{R_1}, \frac{R_1}{h}\right), \quad (3.6)$$

где $f\left(\frac{R_0}{R_1}, \frac{R_1}{h}\right)$ - некоторая функция указанных параметров.

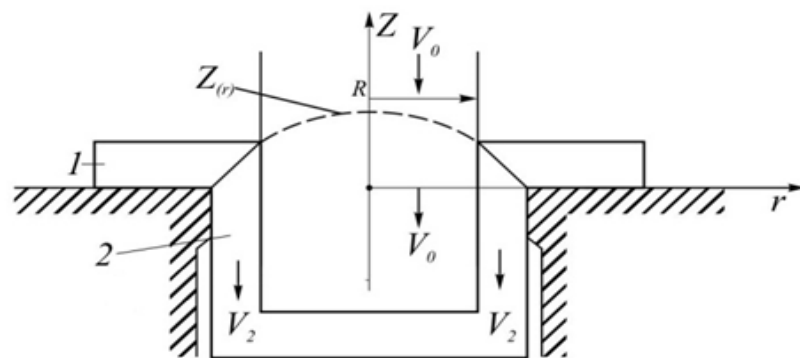
При $f\left(\frac{R_0}{R_1}, \frac{R_1}{h}\right) = 1,0$ реализуется срез по цилиндрической поверхности радиусом R_1 и значения функции $f > 1$ недопустимы, поэтому при любых формулах в случае превышения величиной f данного предела следует принимать $f = 1,0$. Для анализа функции $f\left(\frac{R_0}{R_1}, \frac{R_1}{h}\right)$ используем метод построения кинематически допустимого поля скоростей, которое, как было указано выше, дает в общем случае завышенное значение усилия P . На рис.3.3 показаны два варианта кинематически допустимых полей скоростей при вытяжке.

Принимаем, что всю зону деформации можно разделить на несколько участков. При плоской деформации, рис.3.3а, имеются 3 жесткие зоны, две из которых: 1 и 2 движутся в противоположных направлениях вдоль оси r с постоянной скоростью $v_r = \text{const.} = \pm v_1$, зона 3 движется вдоль оси z , (очевидно, что $v_1 h = 2 v_2 h$ и компоненты v_1 и v_2 связаны этим соотношением (причем $v_2 = v_0$, где v_0 – скорость пуансона).

При осесимметричной деформации скорость в зоне 1 не может быть постоянной, (в отличие от поля на рис.3.3а). Скорость в зоне 2 принимаем постоянной и равной скорости пуансона v_0 . Такое, кинематически возможное поле скоростей существует только в том случае, если существует такая поверхность вращения $Z(r)$, на которой возможно обеспечить условие непрерывности нормальной компоненты скорости v_n , (а тангенциальная ее компонента для идеальной жесткопластической среды может иметь разрыв).



а



б

Рисунок 3.3 – Два варианта кинематически допустимых полей скоростей: а – при плоской деформации; б – при осесимметричной деформации

Согласно расчетам такая поверхность: параболоид вращения существует и ее уравнение

$$Z(r) = \frac{(R_1+h)^2 - r^2}{2R_1+h} \quad (3.7)$$

В кольцевой зоне примем компоненты скорости

$$v_r = -v_0 \frac{R_1}{r}; v_z = 0 \quad (3.8)$$

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.

Мощность формоизменения равна

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

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 $Z(r)$.

С учетом мощности сил трения ($\mu P v_0$), где P – усилие деформации, μ – коэффициент трения, получим

$$P v_0 = N_1 + N_2 + \mu P v_0, \text{ откуда следует } P = \frac{2\pi k R_1 h}{1-\mu} \left(1 + 2 \ln \frac{R_0}{R_1}\right).$$

Поскольку величина $\frac{h}{2R_1}$, обычно, намного меньше единицы, ей можно пренебречь и тогда получим

$$P = \frac{2\pi \sigma_T h}{\sqrt{3}(1-\mu)} (1 + 2 \ln A_2), \quad (3.9)$$

что соответствует формуле (3.6).

Разумеется, тот факт, что при допущении $f = 1,0$ мощность (усилие) минимальна, не означает, что деформация происходит путем среза кольца радиусом R_1 по его контуру. Это означает только, что такая величина мощности ближе к точному решению, (пока нам неизвестному).

Были проведены также расчеты деформации изгиба листовых заготовок с изменением их кривизны и с учетом двух главных радиусов кривизны поверхности деформируемых заготовок.

Изложенные выше расчеты показывают возможность возникновения двух видов дефектов при вытяжке: а) возникновению кольцевых трещин при воздействии напряжений растяжения σ_r и б) потеря устойчивости при действии напряжений сжатия σ_θ . Обычно любой из этих дефектов приводит к неисправимым дефектам. Согласно имеющимся опытным данным, для многих сталей предельное соотношение радиусов равно $\frac{R_0}{R_1} = 2,5$.

Часто кольцевая трещина зарождается при максимальной величине R_0 , а далее развивается в процессе деформации (например, на рис. 1.5г показан стакан радиусом $R_0 = 105$ мм при $R_1 = 55$ мм, толщиной листа 0,5 мм) и видна развитая кольцевая трещина.

Второй отрицательный фактор – потеря устойчивости может происходить при воздействии критического напряжения сжатия σ_k , где

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 k_1 E}{12(1-\gamma^2)} \left(\frac{h}{R_0 - R_1} \right)^2 \quad (3.10),$$

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

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

$$A = \left(\frac{R_0 - R_1}{h} \right)_k = 1,34 \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}}. \quad (3.11)$$

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

Пределные длины изделий («стаканов»), которые можно получить вытяжкой, равны

$$L = (1,34 \dots 1,70) \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}}, \quad (3.12)$$

и, следовательно, эта длина ограничена условием потери устойчивости и образованием волн по периметру кольцевой заготовки.

В критерий устойчивости процесса вытяжки, входят три параметра: R_0, R_1 и h , но они всегда в реальных условиях могут быть определены не точно, а с погрешностями: $\Delta R_0, \Delta R_1$, и Δh , т. е. $A = A_0 + \Delta A$.

Поскольку возможное изменение параметра

$$\Delta A = \frac{\partial A}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial A}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial A}{\partial h} \Delta h = \frac{\Delta R_0}{h} - \frac{\Delta R_1}{h} - \frac{(R_0 - R_1)}{h^2} \Delta h$$

Можно записать эту формулу, как алгебраическую сумму относительных погрешностей аргументов

$$\frac{\Delta A}{A_0} = \frac{R_0}{R_0 - R_1} \frac{\Delta R_0}{R_0} - \frac{R_1}{R_0 - R_1} \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta h}{h} \quad (3.13)$$

Если, например, $R_0 = 100$ мм, $R_1 = 50$ мм, $h = 1,5$ мм, то параметр $A_0 = 33,3$. Но если возможны отклонения $\Delta R_0 = \Delta R_1 = 1$ и $\Delta h = 0,1$ мм, то по формуле (3.13) получим, (в наихудшем случае, когда $\Delta R_0 > 0, \Delta R_1 < 0, \Delta h < 0$)

$$\Delta A = 33,3 \left(\frac{100}{50} \cdot \frac{1}{100} + \frac{50}{50} \cdot \frac{1}{50} + \frac{0,1}{1,5} \right) = 3,56.$$

Поэтому возможны колебания параметра A в диапазоне $A = 29,7 \dots 36,9$.

Наибольшее влияние на колебания функции A оказывает разнотолщинность листового проката. При больших отклонениях Δh , надо использовать не дифференциальную (3.13), а более точную зависимость $\Delta A_m = (R_{00} - R_1) \left(\frac{1}{h + \Delta h} - \frac{1}{h} \right)$.

Экспериментальные исследования процессов вытяжки цилиндрических изделий из сталей 08кп и 45 радиусами $R_0 = 100$ мм при $R_1 = 50$ 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, (но наблюдались случаи потери устойчивости с числом волн, равным 14).

Опыты с использованием 50 одинаковых 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 поскольку величина A значительно превышает $A_m = 40 - 44$, то возникает потеря устойчивости и волнистость в 70...90% случаев.

Поскольку расширению сортамента за счет увеличения параметра A препятствует потеря устойчивости деформируемой заготовки (и искажение ее конфигурации), то был разработан новый способ вытяжки, заключающийся в том, чтобы уменьшить жесткость заготовки в тангенциальном направлении, т.е. создать искусственную анизотропию.

Эта цель достигается за счет осуществления локальной деформации заготовки, (до начала или в процессе основной деформации).

3.2. Разработка методики расчета усилий при осесимметричной деформации листовых заготовок

Выше было указано, что если удастся построить кинематически допустимое поле скоростей, т.е. такое поле скоростей, которое

- а) удовлетворяет условию несжимаемости,
- б) удовлетворяет краевым условиям для скоростей в данной задаче,

в) определяет положительную величину мощности, то такое поле определяет величину мощности N , которая не может быть меньше, чем мощность, определяемая точным решением данной задачи. Метод построения кинематически допустимых полей скоростей был использован для рассмотрения многих задач [10,16,27,106,108÷ 118]. Аналогично решениям [108-114] можно построить простейшее поле скоростей, состоящее из двух зон, показанных на рис. 3.4. Одна зона движется, как

жесткая часть деформируемого тела в направлении, параллельном оси z , и в этой зоне скорости равны: $v_z = -v_0$; $v_r = 0$.

Вторая зона, имеющая форму диска, с наружным радиусом R_0 (рис. 3.4) не является жесткой и в ней можно использовать поле скоростей:

$$v_r = -v_0 \frac{R_1}{r}; v_z = 0$$

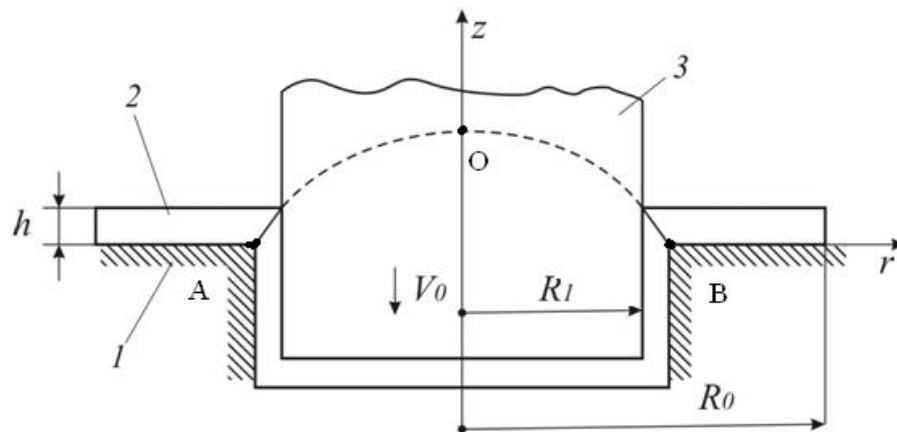


Рисунок 3.4 – Схема кинематически допустимого поля скоростей при осесимметричной деформации

В этих условиях процесс деформации реализуется без изменения толщины. Такое поле является кинематически возможным, если существует такая граничная поверхность, на которой равны нормальные компоненты векторов скоростей в обеих зонах.

Как было показано в работе [116], такая поверхность существует и ее уравнение:

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

В работе [118] использован приближенный способ определения усилий при деформации тонких листов.

При деформации плоского листа толщиной h с формированием из него заготовки с конфигурацией, описываемой функцией $y(x)$, рис. 3.5, принимают работу деформации в виде

$$A_1 = \int_{-0,5b}^{+0,5b} p(x)y(x)dx,$$

где b - ширина симметричной заготовки; $p(x)$ - давление, как показано в [118], если исходная заготовка не является плоской, а описывается уравнением $y_0(x)$, то вместо $y(x)$ в следует подставить функцию $y(x) - y_0(x)$.

Усреднив давление, т.е. приняв $p(x) = p_c$ можно записать

$$A_1 = p_c b S,$$

где S - площадь, ограниченная начальной и конечной кривыми.

Работу внутренних сил A_2 для малого элемента dx можно записать в виде, рис. 3.5а:

$$dA_2 = M_n d\varphi = M_n K dx,$$

$$K(x) = \frac{1}{R(x)},$$

где пластический момент $M_n = \frac{\sigma_T h^2}{4}$, (при плоской деформации $\frac{(2k)h^2}{4}$), $d\varphi$ - малый угол поворота, равный $K dx$, K - кривизна линии $y(x)$, $R(x)$ - радиус кривизны. Отсюда получаем, [118]

$$A_2 = \frac{(2k)h^2 b l}{4} K_c,$$

где среднее значение кривизны $K_c = \frac{1}{b} \int_{-0,5b}^{+0,5b} |K| dx$, а l - длина заготовки в направлении, перпендикулярном осям y и x .

При этом следует принимать абсолютные величины кривизны, поскольку работа положительная при любом знаке функции $K(x)$. Это относится к изгибу цилиндрической заготовки, рис. 3.5б.

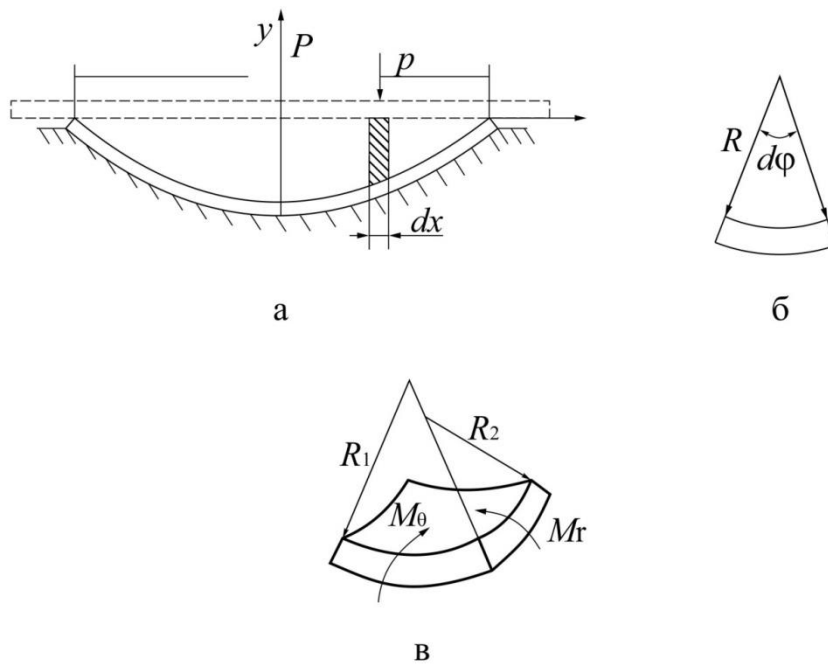


Рисунок 3.5 – Схема деформации листовой заготовки: а – расчетная схема деформации; б – изгиб малого элемента; в – действие на заготовку изгибающих моментов

При вычислении средней кривизны K_c , учитывая, что

$$K_c = y''(1 + y'^2)^{-1,5}, y' = \frac{dy}{dx}, \text{ получаем}$$

$$K_c = \frac{1}{b} \int_{-0,5b}^{+0,5b} y''(1 + y'^2)^{-1,5} dx = \frac{y'}{b\sqrt{1+y'^2}} \Big|_{-0,5b}^{+0,5b} = \frac{1}{b} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2),$$

где α_1 , и α_2 – углы наклона касательной к линии $y(x)$ в сечениях $x = +0,5b$ и $x = -0,5b$, а для симметричной кривой $\sin \alpha_2 = -\sin \alpha_1$ и получаем работу внутренних сил

$$A_2 = (2k)lh^2 \frac{\sin \alpha_1}{2}.$$

С учетом трения для деформации получим усилие и среднее давление [118]

$$p_c = \frac{(2k)bh^2K_c}{4(S - \mu b^2)}$$

При изгибе заготовки в двух направлениях имеют место два радиуса кривизны R_1 и R_2 , как показано на рис. 3.5в и соответственно два значения кривизны: K_1 и K_2 .

Тогда можно, следуя работе [118], определить работу внутренних сил

$$A_2 = \int_0^{0,5d} \int_0^{2\pi} (M_r |K_1| + M_\theta |K_2|) r dr d\theta,$$

где d – диаметр заготовки, M_r и M_θ изгибающие моменты, равные [118]

$$M_r = \frac{\sigma_T h^2}{4} \left(1 - \frac{4r^2}{d^2} \right), M_\theta = \frac{\sigma_T h^2}{4},$$

а главные значения кривизны для тел вращения (симметричные)

$$K_1 = y''(1 + y'^2)^{-1,5}; K_2 = y'(1 + y'^2)^{-0,5}$$

В результате получаем [118]

$$A_2 = 6\sigma_T \pi h^2 d J,$$

где $J = \int_0^{0,5} \frac{y' u^2}{\sqrt{1 + y'^2}} du, u = \frac{r}{d}$ – безразмерная переменная.

Например, для штамповки шарового сегмента диаметром d и высотой H , приравняв $A_1 = A_2$, получим

$$J = \frac{H}{8d} \left(1 + \left(\frac{4H^2}{d^2} \right)^{-1} \right),$$

$$p_c = \sigma_T \frac{6h^2}{d^2} \left(1 + \frac{4H^2}{d^2} \right)^{-1}$$

При $\frac{H}{d} \rightarrow 0$, т.е. для начальных стадий штамповки плоского листа, получаем $p_c = \sigma_T \frac{6h^2}{d^2}$, что совпадает с результатами точного решения для плоской круглой пластины диаметром d и толщиной h , нагруженной постоянным давлением [123].

В [118] приведены формулы для штамповки из листа заготовок в форме конуса, эллипсоида и других поверхностей.

3.3. Определение параметров устойчивости и разработка новой технологии вытягивания цилиндрических заготовок

Как показано выше, процесс вытяжки приводит к тому, что на участке плоского диска реализуется деформация сжатия.

При упругой деформации напряжение определено законом Гука

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1 - \gamma^2} (\varepsilon_{\theta} - \gamma \varepsilon_r),$$

а при $\varepsilon_r = -\varepsilon_{\theta}$, $\sigma_{\theta} = \frac{E\varepsilon_{\theta}}{1 - \gamma}$ и следуя (3.8)

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1 - \gamma^2} \ln \left[1 - \frac{2R_1}{R_{00}^2} v_0 \tau \right],$$

где $v_0 \tau$ - перемещение пуансона в процессе деформации.

Но на краю диска $r = R_{00}$, и $\sigma_r = 0$ и поэтому максимальная по модулю деформация сжатия соответствует величине $\sigma_r = 0$

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1 - \gamma^2} \ln \left(1 - \frac{2R_1 v_0 \tau}{R_{00}^2} \right)$$

Деформация сжатия при воздействии тангенциальных напряжений может привести к потере устойчивости и образованию «складок», т.е. выступов волнистой формы, как показано на рис. 3.6.

В работе [118] для критических напряжений приведена формула

$$\sigma_{\theta} = \sigma_K = \frac{\pi^2 K_1}{12(1 - \gamma^2)} \left(\frac{h}{R_{00} - R_1} \right)^2,$$

где E - модуль упругости; γ - коэффициент Пуассона; K_1 - коэффициент, зависящий от величины $\frac{R_{00}}{R_1}$, изменяющийся в диапазоне от $K_1 = 1,49$ до величины $K_1 = 2,52$. Если принять среднее значение $K_1 = 2$, [118], то получим $\sigma_K = 2,19 E \left(\frac{h}{R_{00} - R_1} \right)^2$.

Если же принять, что потеря устойчивости происходит при $\sigma_K = \sigma_T$ (σ_T - предел текучести при сжатии), то получим

$$A = \frac{R_0 - R_1}{h} = 1,48 \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}}$$

Например, если $E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, $\sigma_T = 300 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, то предельное значение равно

$$A_m = \left(\frac{R_0 - R_1}{h} \right)_m = 38,2$$

При $\gamma=0,3$ получим величину отношения $\left(\frac{R_0-R_1}{h}\right)_m = 1,8 \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}}$ и при тех же величинах E и σ_T

$$A_m = \left(\frac{R_0-R_1}{h}\right)_m = 46,48 \approx 46,5$$

Предложен алгоритм моделирования технологических процессов вытяжки тонколистовых осесимметричных заготовок с использованием вычислительных систем конечно элементного анализа. Для создания компьютерной модели технологического процесса вытяжки использован программный комплекс DEFORM 3D, который позволил моделировать формоизменение, прогнозировать потерю устойчивости и образование на заготовке волн большой амплитуды. Полученные результаты на 10-15% отличались от результатов реальных экспериментов.

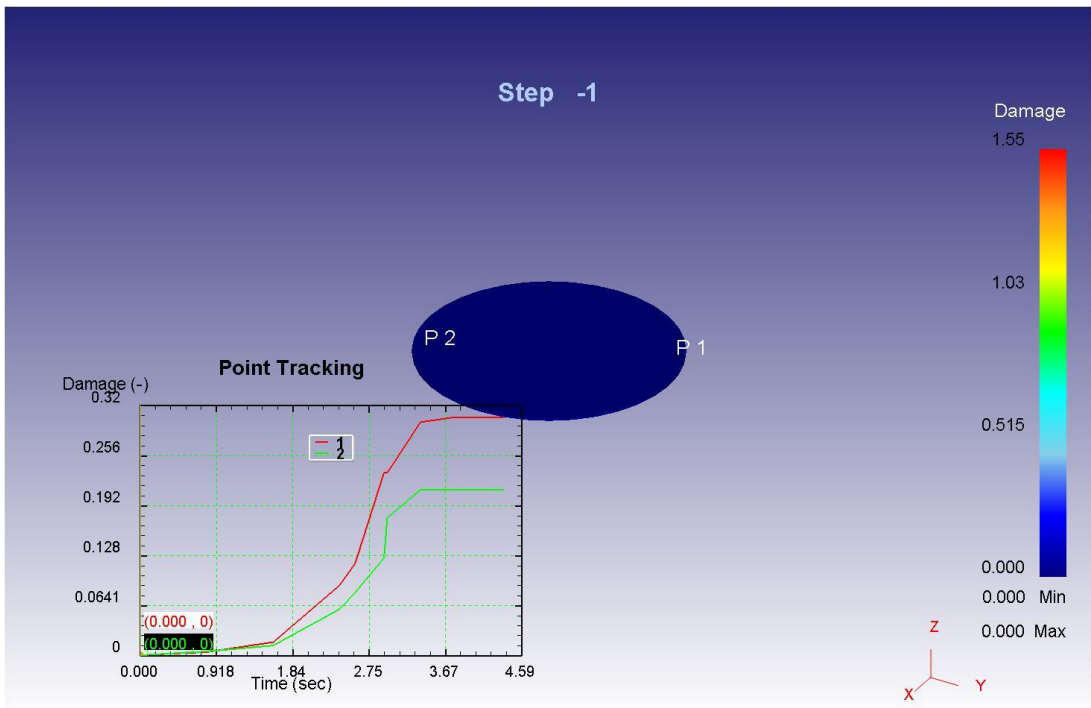
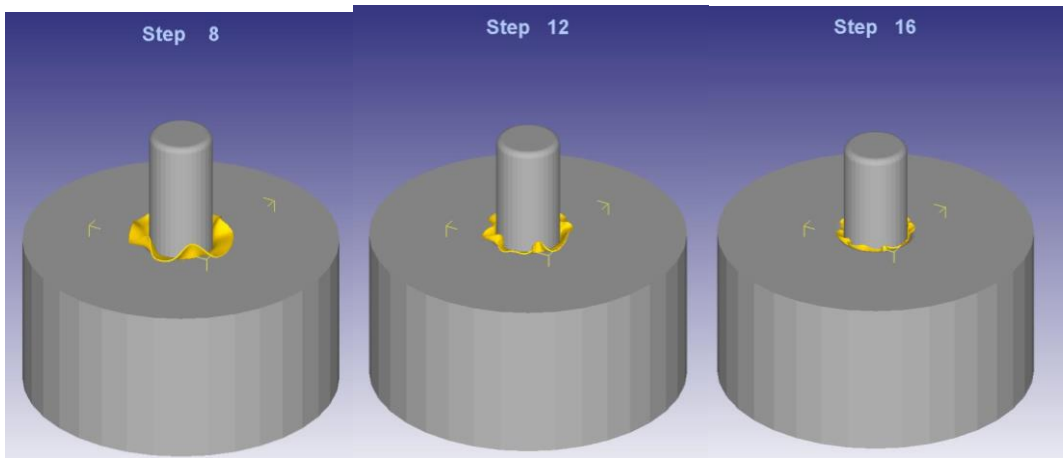
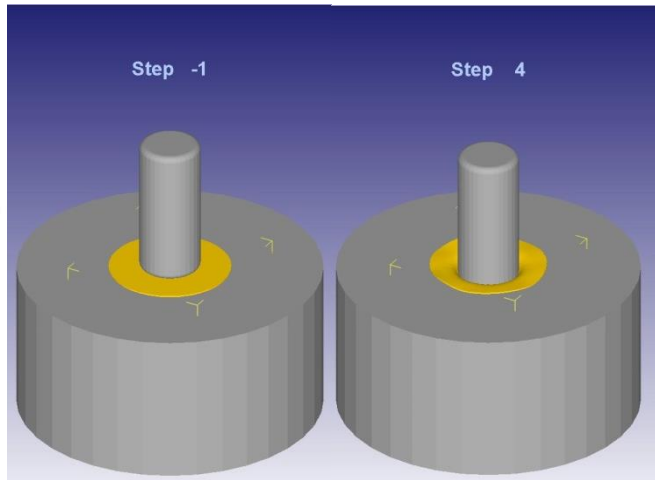
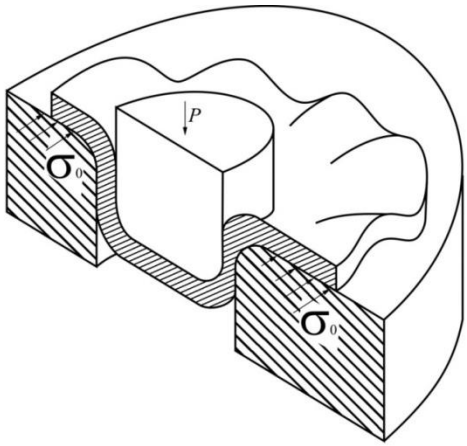
При моделировании вытяжки удалось качественно и количественно оценить напряженно-деформируемое состояние кольцевой части фланцевой части заготовки, рис.3.6.

Поскольку максимальная величина R_0 имеет место в начале процесса, когда $R_0 = R_{00}$, (при $\tau = 0$), то в формулах следует принимать вместо R_0 величину R_{00} .

Если для углеродистой стали $E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$; $\sigma_T = 250 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, то параметр $A_m = 42$.

В некоторых случаях формула дает результаты, близкие к данным Л.А. Шофмана [16], согласно которым величина критического отношения $(R_0 - R_1)$ и h равна 44, но в литературе встречаются рекомендации по принятию этой величины, равной от 20 до 55 (и даже в более широком диапазоне). Конечно, эти формулы являются приближенными. Из этой формулы можно получить, что предельная длина цилиндрической заготовки, которую можно получить вытяжкой, равна:

$$L = (1,48 \div 1,80) \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}}$$



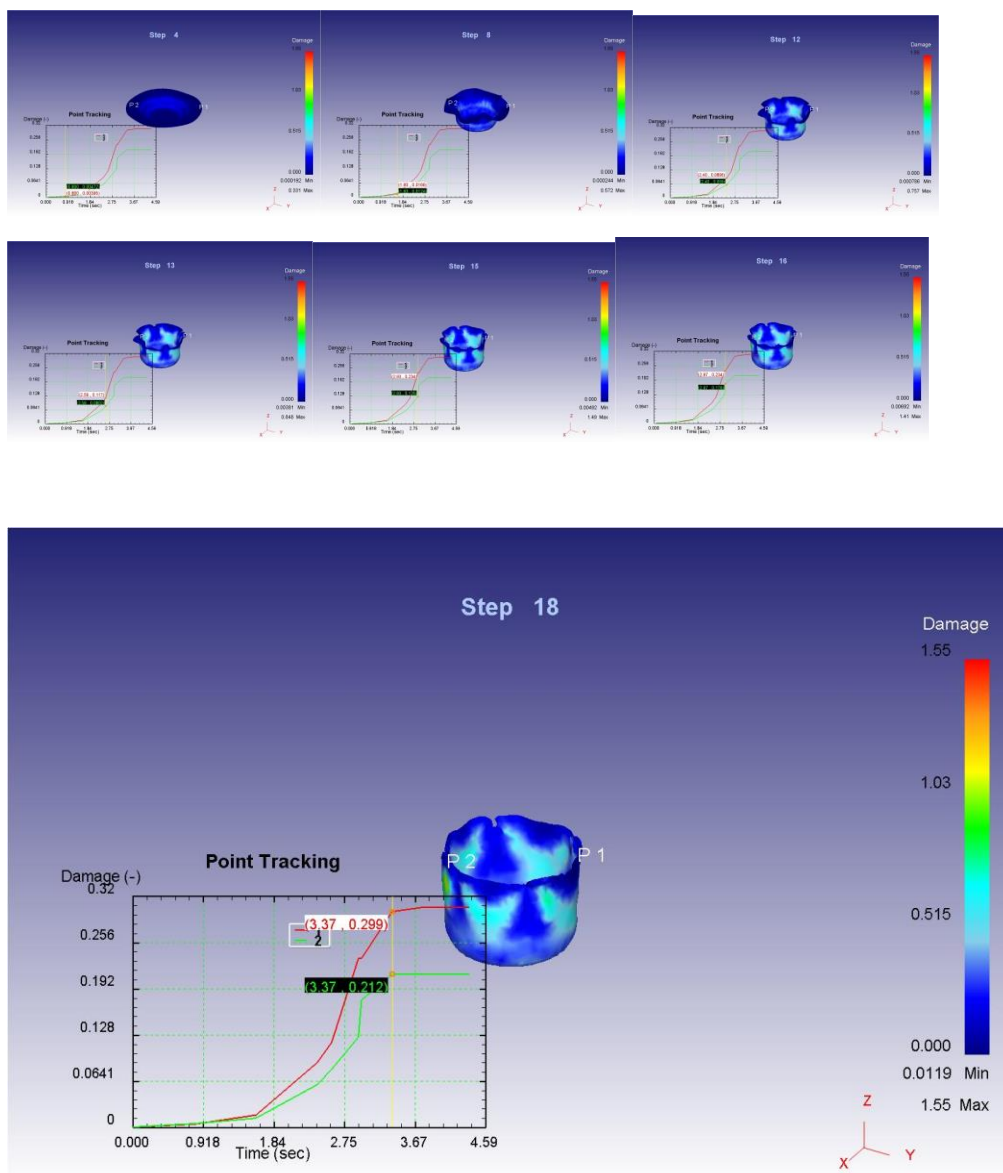


Рисунок 3.6 – Образование складок при потере устойчивости деформируемой заготовки: результаты компьютерного моделирования технологического процесса вытяжки заготовки

В монографии И.А. Биргера и др. [120] приведена для критического напряжения аналогичная формула в виде

$$\sigma_K = \frac{C_1 E}{12(1 - \nu^2)} \frac{h^2}{R_0^2};$$

но опыт указывает на то, что решающее влияние на устойчивость оказывает не величина $\frac{h}{R_0}$, а параметр $\frac{h}{R_{00} - R_1}$.

Можно получить аналогичные формулы, но с несколько более высокими значениями и числового множителя. Также в [120] указано, что условие потери устойчивости может произойти при $\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2} - \sigma_r \sigma_\theta = \sigma_T$, т.е. при достижении условия текучести.

На краю диска, где $\sigma_r=0$ это условие имеет вид $|\sigma_\theta|=\sigma_T$, которое было использовано и получено:

$$A_m = \frac{R_{00}-R_1}{h} = C_0 \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}},$$

где постоянная $C_0 = 1,48 \div 1,80$, что обычно дает величины $A_m = 38 \div 47$.

В работах Л.А. Шофмана рекомендовано принимать $A_m = 44$, [16], аналогичные методы развиты в работе [118].

Еще ранее, (в 1934 году) И.В. Геккелер [121] опубликовал формулу $\sigma_K = 0,46 \frac{Eh^2}{(R_{00}-R_1)^2}$ и при $\sigma_K = \sigma_T$ получаем $C_0 = 0,68$, что значительно ниже, чем величины, приведенные выше.

Однако не учитывали, что условие устойчивости $A = \frac{R_{00}-R_1}{h} < A_m$ может быть нарушено за счет отклонений аргументов R_{00}, R_1 и h от их номинальных значений. Эти параметры всегда являются неопределенными в некоторых диапазонах $R_1 \pm \Delta R_1, R_{00} \pm \Delta R_{00}, h \pm \Delta h$.

Как правило, таких точных величин не существует, а сами аргументы являются в некотором диапазоне неопределенными.

Если рассматривать функцию $A_m(R_{00}, R_1, h)$ как функцию трех аргументов, то малое относительное изменение этой функции равно

$$\Delta A_m = \frac{\partial A_m}{\partial R_{00}} \Delta R_{00} + \frac{\partial A_m}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial A_m}{\partial h} \Delta h.$$

Относительное изменение при

$$\frac{\partial A_m}{\partial R_{00}} = \frac{1}{h}; \quad \frac{\partial A_m}{\partial R_1} = -\frac{1}{h}; \quad \frac{\partial A_m}{\partial h} = -\frac{(R_{00} - R_1)}{h^2};$$

$$\frac{\Delta A_m}{A_m} = \frac{R_{00}}{R_{00} - R_1} \left(\frac{\Delta R_{00}}{R_{00}} \right) - \frac{R_1}{R_{00} - R_1} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) - \frac{\Delta h}{h}$$

В наихудшем случае, когда $\Delta R_{00} > 0$; $\Delta R_1 < 0$ и $\Delta h < 0$ влияние отклонений суммируется, что необходимо учитывать.

Если, например, $R_{00} = 0,10$ м, $R_1 = 0,05$ м и $h = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, то параметр $A_m = \frac{0,10 - 0,05}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 33,3$.

Из приведенных формул следует:

$$\frac{\Delta A_m}{A_m} = \frac{0,10}{0,05} \frac{\Delta R_{00}}{R_{00}} - \frac{0,05}{0,05} \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta h}{h},$$

$$\frac{\Delta A_m}{A_m} = 2 \frac{\Delta R_{00}}{R_{00}} - \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta h}{h}.$$

Если отклонения $\Delta R_{00} = 0,01$ мм, $\Delta R_1 = -0,01$ мм, $\Delta h = -0,001$ 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

$$\frac{\Delta A_m}{A_m} = 0,1 + 0,2 + 0,67 = 0,97;$$

а $\Delta A_m = 32,3$ и возможны колебания параметра A_m в пределах до 65,6 с нарушением устойчивости деформируемой заготовки.

График отклонения $|\Delta A_m|$ при $R_0 = 8 \cdot 10^{-2}$ м, $R_1 = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $h = 10^{-3}$ м приведен на рис. 3.7 (линия 1).

$$|\Delta A_m| = \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}} = 40,$$

а при $h = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta A_m = 15$.

На рис. 3.7 линия, соответствующая более точной формуле, 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. Может оказаться, что вывод об устойчивости процесса при $A < A_m$ окажется неправильным, поскольку за счет отклонений окажется, что $A > A_m$.

Расчеты показывают, что наибольшее влияние на колебания функции A_m и ее отклонений от номинальных значений оказывает

разнотолщинность листового проката. Даже при разнотолщинности 0,01-0,02 мм ее влияние может быть значительным.

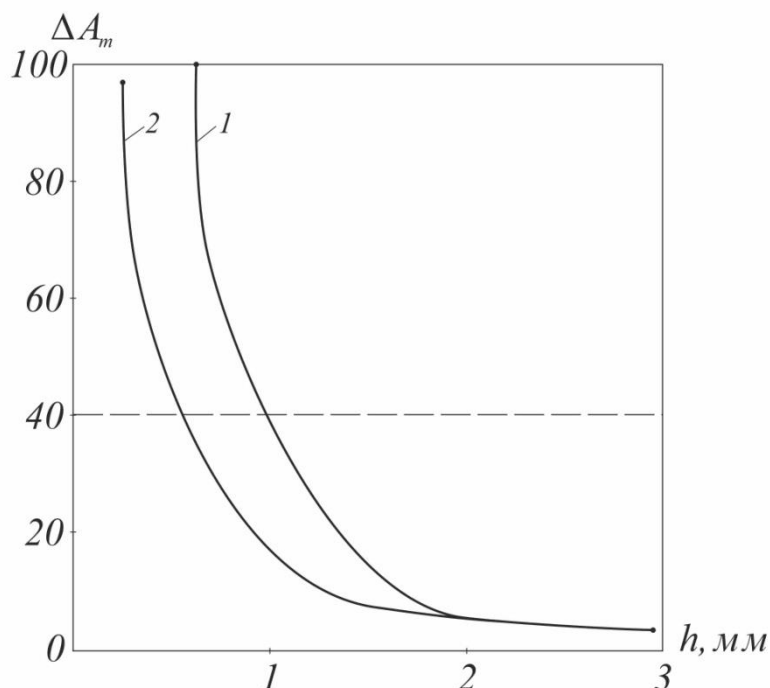


Рисунок 3.7- График функции $\Delta A_m(h)$

Пунктиром на рис.3.7 показана предельно допустимая величина $A_m = 40$ и видно, что трудности получения качественных изделий возрастают при $h < 1$ мм, когда отклонения при неблагоприятных изменениях толщины могут превысить допустимую величину A_m и привести к дефектам заготовок из-за искажений формы заготовки. Однако следует учитывать, что при больших отклонениях Δh , надо использовать не дифференциальную зависимость, а более точную:

$$\Delta A_m = f(R_0, R_1, h + \Delta h) - f(R_0, R_1, h)$$

$$\text{или } \Delta A_m = (R_{00} - R_1) \left(\frac{1}{h + \Delta h} - \frac{1}{h} \right) = - \frac{(R_{00} - R_1) \Delta h}{h(h + \Delta h)}$$

Например, если $R_{00} - R_1 = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $h = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta h = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м,

$$\Delta A_m = - \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3} \cdot 0,5}{10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} = 10$$

и если $A_m = 30$, то возможны изменения этого параметра в диапазоне 30 ± 10 , т.е. $20 \div 40$.

Были проведены экспериментальные исследования процессов вытяжки цилиндрических изделий из сталей 08кп и стали 45 радиусами $R_{00} = 100$ мм при $R_1 = 50$ мм, 60 мм, 70 мм и $h = 0,5$ мм; 1 мм; 1,25 мм.

Нарушения устойчивости наблюдались начиная с величины $A = 32-34$, но число таких случаев не превышало 10%. При $A = 35-38$ оно возросло до 12-14%, а при $A = 40 \div 44$ превысило 50%. Число волновых выступов было в 20% всех случаев равным 4-6, а в 25-30% опытов 10-12, (но наблюдались случаи потери устойчивости с числом волн, равным 14).

Опыты с использованием 50 одинаковых 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 поскольку величина A значительно превышает $A_m = 40-44$, то возникает потеря устойчивости и волнистость. Тем не менее, в двух случаях из 50 при этом потери устойчивости не произошло, и заготовки оказались высокого качества. Указанное свидетельствует о значительном разбросе данных, что является характерным признаком данного процесса деформации листовых заготовок.

Число «волн», превышающее 14 в наших опытах не наблюдалось, однако, в литературе встречаются и большие величины. Для объективного изложения данного вопроса укажем, что более высокие значения « n » получил И. Геккелер [121].

Нахождение условия деформации для металлов с постоянной величиной предела текучести, т.е. с незначительным упрочнением, например, если наклеп (упрочнение) было достигнуто перед вытяжкой, в частности, в процессе прокатки. После отжига металл в процессе деформации вытяжки может существенно упрочняться и это уменьшает возможность потери устойчивости и увеличивает параметр A_m до 48-52.

Существенно уменьшает этот параметр высокая разнотолщинность проката, из которого изготовлена заготовка. Этот же фактор заметно влияет на возможность развития кольцевых трещин. Эти трещины могут возникать при $\frac{R_{00}}{R_1} \geq 2,1 - 2,2$ и они также ограничивают возможности процесса вытяжки. Кольцевые трещины могут возникать в начале процесса деформации, а затем они развиваются и увеличиваются в процессе деформации, что иллюстрируется рис. 3.8, на котором показаны заготовки с трещинами (в первой из них кольцевая трещина распространилась на длине половины окружности).



Рисунок 3.8 - Заготовки с кольцевыми трещинами, возникшими в процессе вытяжки

На основании изложенного выше, можно сделать вывод о том, что основной причиной появления дефектов, искажения конфигурации заготовок и развития в них кольцевых трещин является воздействие высоких тангенциальных и радиальных напряжений.

Для повышения качества заготовок и уменьшения напряжений был разработан новый технологический процесс вытяжки [122].

Следует отметить, что усилие, соответствующее деформации среза, на радиусе R_1 было бы равным

$$P_o = 2\pi k R_1 h,$$

т.е. произведению величины « k » на площадь участка цилиндра радиусом R_1 . Поскольку в этой формуле нет множителя $(1+2\ln\frac{R_o}{R_1}) > 1$, то

можно было бы сделать вывод о том, что усилие среза всегда меньше, чем усилие деформации вытяжки, но это было бы неверно. При перемещении пуансона на величину ΔZ площадь среза уменьшается на $2\pi R_1 \Delta Z$ и на этом участке поверхности реализуется не только пластическая деформация материала стакана при касательном напряжении, равном « k », но и разрушение металла, (путем среза), что приводит к увеличению до величины k , (часть мощности расходуется не на пластическую деформацию, а на разрушение металла вблизи цилиндрической поверхности среза. Чем выше отношение $\left(\frac{k}{R}\right)$ тем более подходит данный металл для вытяжки, (вытяжка заготовок из идеально-пластического металла оказалась бы невозможной). Чем выше упрочнение, (и отношение предела прочности к пределу текучести, тем удобнее изготавливать из данного металла изделия.

3.4. Новый процесс вытяжки цилиндрических втулок и его применение

На основании проведенных исследований, был разработан новый способ вытяжки, основанный на том, чтобы создать в заготовке, выполненной в форме диска, искусственную анизотропию, уменьшив ее жесткость в тангенциальном направлении, (но не изменив ее жесткость в радиальном направлении) [122].

Идея способа заключается в том, чтобы для предотвращения развития нескольких крупных искажений формы заготовки, (которые неизбежно приводят к дефекту изделий), создать на ней большее число малых искажений формы, которые при последующей деформации оставались бы малыми и не ухудшали точность формируемых изделий.

На основании проведенных исследований, [123 – 126] был разработан способ деформации, основанный на том, что на листовой круглой заготовке, (имеющей форму диска), вначале формируют ряд «волн»

(выступов), расположенных вдоль кольцевого пояса, рис. 3.9. Амплитуда указанных волн мала - не более $(1 \div 2)h$, но их количество велико – до 16-28 волн, расположенных, как видно из рис. 3.9 вдоль окружности. Все углубления (волны) целесообразно изготовить одновременно, одним штампом, после чего заготовку следует перевернуть и подвергнуть деформации вытяжки. При этом деформация листа со складками «облегчается», (его жесткость в тангенциальном направлении уменьшена). Различные формы волн и размер волнистости, характеризуется величиной δ , показанной на рис. 3.9.

Можно расположить волны не по краю заготовки, а в ее середине. Даже выполнение волн амплитудой 0,5-1мм на цилиндрической части заготовки после частичной деформации вытяжки дает положительный эффект.

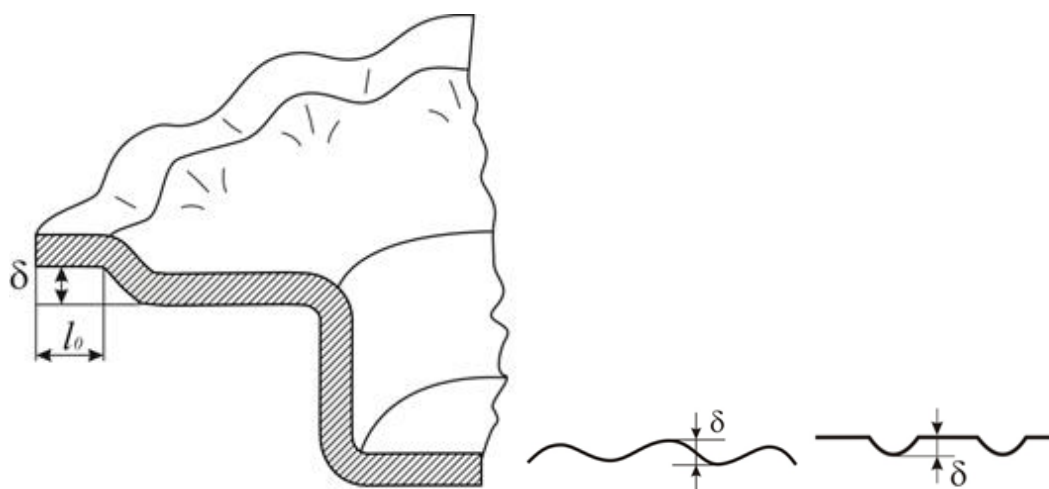


Рисунок 3.9 – Схема нового технологического процесса вытяжки с формированием волн вдоль кольцевого пояса

Разумеется, сформированные выступы остаются на изделии, но в ряде случаев это не снижает их качество и является допустимым.

В данном процессе локальная деформация используется, как дополнительная к основной деформации, (которая остается деформацией вытяжки). Локальная деформация позволяет улучшить процесс основной

деформации – вытяжки изделия. Образцы деформированных заготовок показаны на рис.3.10.



Рисунок 3.10 – Образцы изделий, изготовленных с использованием нового способа

Глубина впадин для листов толщиной 0,5 мм из углеродистой стали составляла 0,5 мм, а число волн было равным 18-26. «Потери устойчивости» с образованием крупных складок, таких, какие показаны на рис. 3.6, не происходит и создается возможность получения изделий длиной в 2-3 раза превышающей допустимую длину, соответствующую обычному процессу вытяжки.

Конечно, при деформации амплитуды «волн» могут возрасти (максимум в 1,4-1,5 раз) и происходит их сжатие (с уменьшением длины «волны» иногда в 1,5 раза), но не возникают новые волны большой амплитуды.

Основная идея способа состоит в том, чтобы заранее создать на листовой заготовке (диске) большое количество «волн» малой амплитуды для предотвращения возможности появления 4-6 складок большой амплитуды. Это уменьшает жесткость деформируемой заготовки, а после 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.

Конечно, искусственные волны (выступы) остаются на изделии. Способ, разумеется, неприменим в тех случаях, когда наличие даже малых волн на изделии недопустимо, но во многих случаях такие выступы (впадины) амплитудой менее 1-2мм, нисколько не ухудшают качества изделий и могут быть допущены. Существенной особенностью способа [125] является то, что мы уменьшаем жесткость заготовки, а за счет этого уменьшаются обе компоненты тензора напряжений: σ_θ , и σ_r .

По аналогии можно указать, что прямолинейный стержень – рис. 3.11а, требует для деформации сжатия больших усилий и при некоторой критической силе, и деформации, равной $\varepsilon_0 = 7,84 \frac{J}{Fl^2}$ теряет устойчивость, (здесь F – площадь сечения стержня, J – момент инерции его сечения, l – длина).

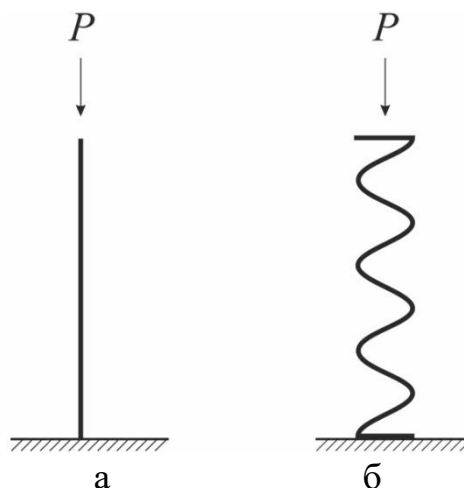


Рисунок 3.11 – Схема деформации при сжатии стержней: а – высокой жесткости; б – низкой жесткости

При дальнейшем сжатии стержень теряет свою конфигурацию и прогиб быстро возрастает и может достигать величин $0,5l$ и более.

Если же изготовить стержень таким, как показано на рис. 3.11б, т.е. менее жестким, то он и при более высоких деформациях: $2\varepsilon_0$, $3\varepsilon_0$ сохраняет свою общую конфигурацию. Его жесткость, конечно, будет намного меньше, чем прямого стержня, но резких изменений общей формы тела не произойдет (деформируемые тела в виде рис. 3.11б также

могут «терять устойчивость», но, как правило, при деформациях, в несколько раз превышающих величины ε_0 для прямолинейного стержня).

В некоторых случаях искусственное уменьшение жесткости заготовки, подвергаемой глубокой вытяжке, может быть полезным.

Рассмотрим для иллюстрации способа создания искусственной анизотропии схему растяжения двух листов, рис. 3.12.

Осуществляется растяжение листа постоянной толщины вдоль оси x напряжениями σ_x , рис. 3.12а и для сравнения реализуют аналогичную деформацию листа тех же размеров, но с выдавленным углублением – рис. 3.12б. Конфигурация данного углубления иллюстрирует рис. 3.12 в.

Для гладкого образца $\sigma_x = \frac{P}{bh}$; $\sigma_y = \frac{P}{lh}$, где P - усилия растяжения листовой заготовки. Упругая деформация определена законом Гука.

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 , то можно записать: $\Delta l = \frac{P}{C}$, где жесткость данного листа при упругой деформации «С» равна: $C = \frac{bhE}{l}$. Для изотропного листа в форме квадрата (при $b = l$) величины жесткости в направлении осей x и y одинаковы.

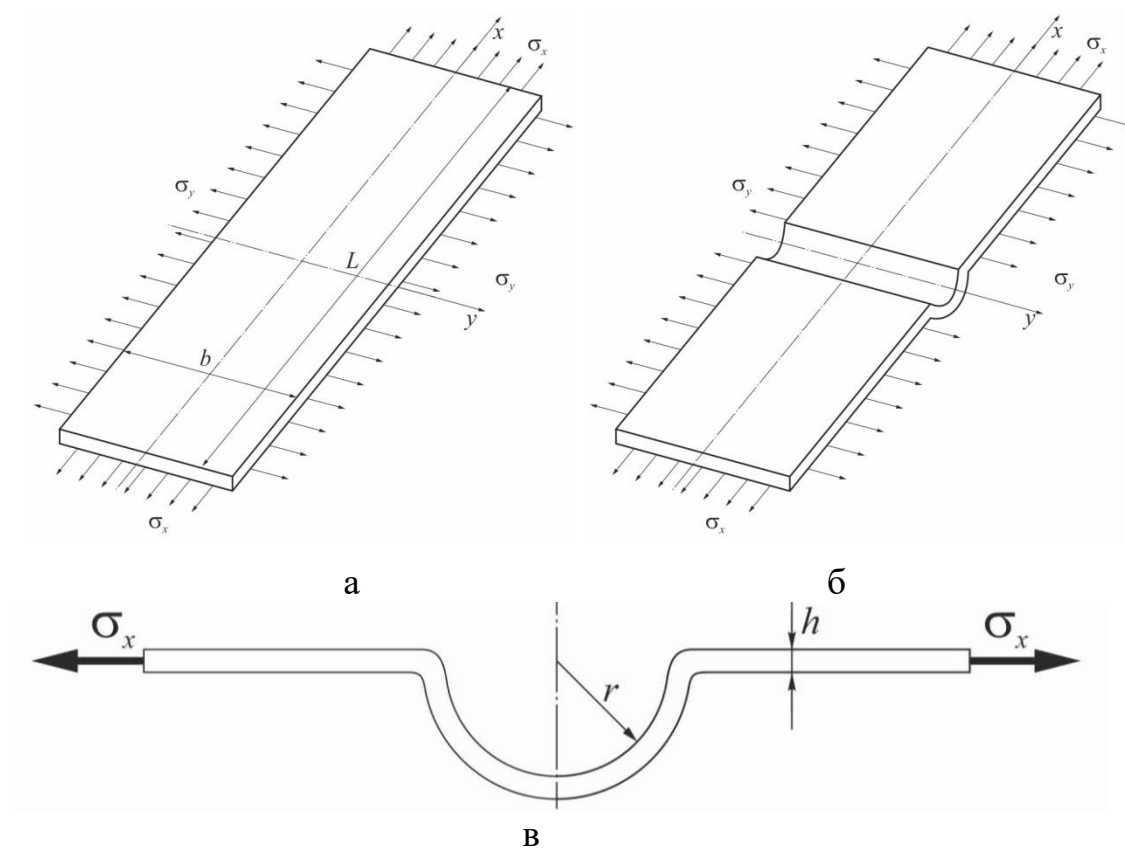


Рисунок 3.12 – Схемы деформации образцов: а – плоской формы; б - с углублением с целью создания искусственной анизотропии; в – форма углубления

Новый способ деформации, предложенный в данной работе основан на том, чтобы до процесса вытяжки создать в листовой заготовке искусственную анизотропию с уменьшением жесткости материала в одном направлении, (относительно деформации окружностей– в тангенциальном) направлении. Такую «искусственную анизотропию» можно создать за счет формовки малого углубления в форме дуги радиусом r , как показано на рис. 3.12в. Термин «искусственная анизотропия» является не вполне точным, так как анизотропия, созданная прокаткой листа в одном направлении также является «искусственной», - она создана пластической деформацией с вытяжкой преимущественно в одном направлении. Анизотропия, создаваемая за счет выдавливания углублений по схеме рис. 3.12в, отличается тем, что она создается в основном, не за счет пластической деформации, а за счет специально используемых изменений

формы деформируемого тела. Такие изменения должны быть «достаточно малыми», чтобы не изменить форму тела настолько, чтобы заготовка стала непригодной для выполнения требуемых функций. Схема деформации криволинейного участка показана на рис. 3.13.

При растяжении участка листа силами P , расстояние между точками A и B увеличивается на величину:

$$\Delta l = \frac{3,84Pr^3}{Ebh^3},$$

где E – модуль упругости, b – ширина листа, h – его толщина.

Наибольший изгибающий момент (в сечении C , рис.3.13) равен $M = Pr$, (растягивающая сила P).

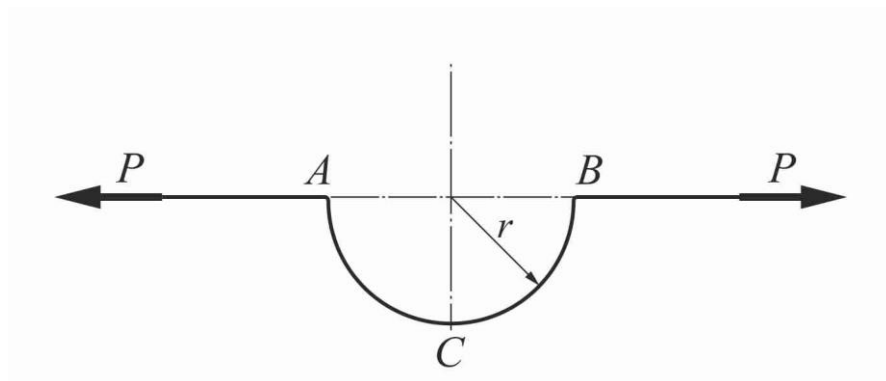


Рисунок 3.13 - Схема деформации участка листа в зоне углубления радиусом r

При растяжении листа вдоль оси x силой P участок длиной $(l-2r)$ подвергается приближенно простому растяжению, (локальный изгиб вблизи сечений A и B не оказывает существенного влияния), и поэтому полное удлинение равно:

$$\Delta l = \frac{P(l-2r)}{Ebh} + \frac{3,84Pr^3}{Ebh^3} \text{ или } \Delta l = \frac{Pl}{Ebh} \left(1 - \frac{2r}{l} + \frac{3,84r^3}{lh^2}\right).$$

Можно записать удлинение в виде $\Delta l = \frac{P}{C}$, где $C = \frac{Ebh}{l} \left(1 - \frac{2r}{l} + \frac{3,84r^3}{lh^2}\right)^{-1}$ - жесткость листа при растяжении. Если углубления на листе нет, то его жесткость равна $C_0 = \frac{Ebh}{l}$, что сохраняется при растяжении вдоль оси y , рис. 3.13. Поэтому можно

сделать вывод, что нанесение углубления приводит к уменьшению жесткости в: $\frac{C}{C_0} = \left(1 - \frac{2r}{l} + \frac{3,84r^3}{lh^2}\right)^{-1}$ раз.

Например, при $l=50$ мм, $h = 1$ мм, $r = h = 1$ мм, получим:

$$\frac{C}{C_0} = \left(1 - 0,04 + \frac{3,84 \cdot 1}{50 \cdot 1}\right)^{-1} = 0,965$$

и данное углубление приведет к уменьшению жесткости на 3,5%. Если выполнить на листе "n" одинаковых углублений, то

$$\Delta l = \frac{Pl}{Ebh} - \left(1 - \frac{2r}{l}n + \frac{3,84Pr^3n}{lh^2}\right) \quad \text{и,}$$

следовательно, соотношение величин жесткости составит:

$$\frac{C}{C_0} = \left(1 - \frac{2rn}{l} + \frac{3,84nr^3}{lh^2}\right)^{-1}.$$

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 . Схема деформации при сжатии представлена на рис. 3.14.

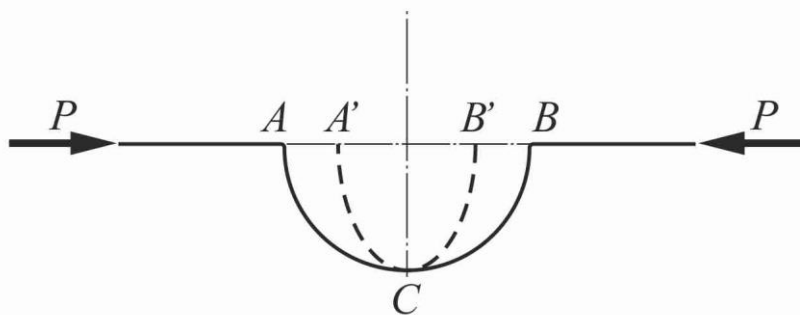


Рисунок 3.14 - Схема деформации участка листа при действии напряжений сжатия

При одноосном растяжении – сжатии листа пластическая деформация начнется, когда напряжения σ будут равны величине предела текучести σ_T , т.е., при усилении:

$$P = \sigma_T bh$$

Выполнение локального углубления приводит к тому, что в сечении C на рис.3.14 будут действовать напряжения сжатия (или растяжения), и напряжения изгиба.

Как показал А.Р. Ржаницын [127], соотношение усилий можно записать в виде соотношения условных пределов текучести. Эта формула применима и при большем числе искусственных искажений формы листа в виде «волн» - впадин малой величины. Эти локальные углубления должны быть малыми во избежание существенных изменений конфигурации изготавливаемой заготовки, (существенное изменение ее конфигурации может оказаться недопустимым). Положение заготовки при деформации показано пунктиром, и точки A и B переместятся в A' и B' . Предельным будет положение, при котором точки A' и B' совпадут, а общее сжатие будет соответствовать величине $(2r)$. График функции $\frac{\sigma_{T1}}{\sigma_T} \left(\frac{h}{r}\right)$ приведен на рис. 3.15.

Можно сделать вывод, о том, что создание искусственной анизотропии с глубиной канавок порядка толщины листа « h » значительно уменьшает тангенциальные напряжения. После деформации глубина канавок возрастает не более чем на 10-15%.

Новый способ позволяет в 1,5-2,0 раза увеличить длину изделий, изготавливаемых за одну операцию.

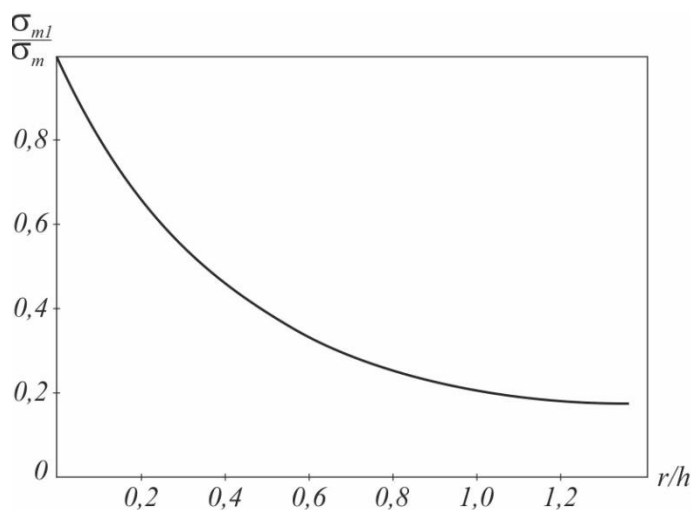


Рисунок 3.15 – График зависимости показателя искусственной

пластической анизотропии, создаваемой углублением в листе

Способ использован в кузнечно-прессовом цехе предприятия ОАО «2462 Центральная база производства и ремонта вооружения и средств радиационной, химической и биологической защиты (ЦБПР)».

Измерения усилий с помощью тензодатчиков на пуансоне показали величины усилий в пределах 240-300 кН.

В качестве материала для фильтров использовали листа стали 08Ю с содержанием углерода 0,03%.

Технологический процесс включал заготовительные операции: разрезание стальных листов на мерные заготовки и вырубку из них дисковых заготовок.

Лист размерами 0,5x1250x2500мм разрезали на три пластины размерами 680x1250 мм и одну размерами 460x625мм.

После операции травления и очистки листы разрезали на полосы следующих размеров 250x68-,85x460мм и другие. Всего из одного листа изготавливали 44 детали. После смазки индустриальным маслом осуществляли вырубку дисков, а потом формировали на ней 18 радиальных впадин. Деформацию осуществляли на прессе КЕ2330 усилием 1МН (100т). При диаметре 146 мм первую операцию осуществляли до высоты 45 мм(диаметром 146мм), затем до высоты 65 мм(при диаметре 120 мм). Третью операцию осуществляют на прессе К2234 усилием 2,5 МН. Фотографии корпусов фильтров, изготовленных новым способом, представлены на рис. 3.10.

Выводы по главе 3:

1.Для осесимметричной деформации листовых заготовок малой толщины получены формулы для определения верхних границ усилий

деформации. Проведен анализ предельных величин отношения $\frac{R_0-R_1}{h}$ и длины получаемых стаканов.

2. Разработан новый способ изготовления полых цилиндрических изделий (см. патент № 2491144RU(11) C2RU, B21D 22/20), предусматривающий изменение формы заготовки за счет создания на ней участков локальной деформации – выступов-впадин, позволяющий в 1,5...3.0 раза увеличить длины изделий, получаемых за одну операцию вытяжки. Процесс внедрен и используется на предприятии ОАО «2462ЦБПР».

3. Процесс вытяжки нельзя считать процессом локальной деформации – он охватывает почти весь объем деформируемого изделия. Но целесообразно предварительно подвергнуть заготовку именно локальной деформации – формированию малых выступов и впадин, что позволяет расширить диапазон изделий, формируемых при общей (не локальной) деформации и повысить качество изделий. В данном случае локальная деформация оказывается полезной и специально добавляется к основному процессу.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВИЗНЫ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ

4.1. Формулы для расчета возможных колебаний кривизны деформируемых заготовок при изгибе

Как правило, в работах, посвященных исследованию процессов изгиба заготовок при упруго-пластической деформации определяют зависимость прогиба от усилия, т.е. определяют усилие, необходимое для реализации заданной деформации.

Часто основной задачей процессов изгиба является не достижение заданного прогиба, а получение необходимой кривизны заготовок. Это

четко видно при формовке изгибом цилиндрических заготовок для труб, (с последующей сваркой продольным швом после изгиба), либо при изготовлении бандажей.

Нас в первую очередь должны интересовать вопросы точности величин кривизны, а не прогиба, который в таких условиях не очень важен.

Действительно, в трубе или в цилиндрическом сосуде радиусом R с толщиной стенки h давление газа (или жидкости) p приводит к появлению тангенциальных напряжений равных

$$\sigma = p \frac{R}{h} = \frac{p}{Kh}, \quad (4.1)$$

В эту формулу (Лапласа) входит именно величина кривизны K , (или обратная ей величина радиуса кривизны).

Понятно, что на практике всегда неизбежными являются колебания этой величины на $\pm \Delta K$.

При малых величинах ΔK можно оценить колебания напряжения

$$\Delta \sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial K} \cdot \Delta K = - \frac{p}{K^2 h} \Delta K$$

или

$$\Delta \sigma = -\sigma \frac{\Delta K}{K},$$

поэтому

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = - \frac{\Delta K}{K} \quad (4.2)$$

Колебания кривизны до $\pm \frac{\Delta K}{K} = \pm 0,1$ приведет к таким же относительным изменениям напряжений. Отклонения напряжений от номинальных величин вынуждает предусматривать значительные «запасы прочности», что приводит к увеличению расхода металла.

Поэтому при изготовлении заготовок деформацией изгиба следует особое внимание уделять вопросам повышения точности кривизны заготовок.

Как было показано выше, при нагружении заготовки при ее изгибе 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 $l_1 < x \leq 0,5l$, $l_1 = \frac{l}{12m}$ и максимальной эта величина будет в центре длины заготовки при $x = 0,5l$.

Максимальная кривизна будет равной

$$K = K_m = \frac{2a}{l\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{1-4m}} \quad (4.3)$$

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.

После нагрузки остаточная кривизна будет равна

$$K_0 = \frac{a}{l} \left[\frac{2}{\sqrt{3}\sqrt{1-8m\frac{x}{l}}} - \frac{24}{l} \right],$$

и при $x = 0,5l$ будет максимальной:

$$K_0 = \frac{a}{l} \left[\frac{2}{\sqrt{3}\sqrt{1-4m}} - 12m \right] \quad (4.4)$$

При $m = \frac{1}{6}$ при нагрузке будет иметь место только упругая деформация и поэтому при полной разгрузке, получим $K_0 = 0$.

Однако в реальных условиях все величины, используемые в формулах (4.3), (4.4) известны не точно, а приближенно, т.е. с некоторыми отклонениями в величинах «а», «l», «m», например:

$$a = a_0 \pm \Delta a; l = l_0 \pm \Delta l; m = m_0 \pm \Delta m.$$

Известно, что если задана некоторая 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 при малых величинах

Δx_i ($i = 1, 2 \dots n$) возможное отклонение функции $f(x_i \pm \Delta x_i)$ от ее номинального значения, равного $f(x_{i0})$ можно приближенно определить по формуле

$$\Delta f = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i, \quad (4.5)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ - частные производные функции.

Если принять формулу (4.3), то отклонение максимальной величины кривизны при нагрузке составит:

$$\Delta K_m = \frac{\partial K_m}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial K_m}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial K_m}{\partial m} \Delta m.$$

Определив величину частных производных получим:

$$\Delta K_m = \frac{2}{l\sqrt{3}\sqrt{1-4m}} \Delta a - \frac{2a}{l^2\sqrt{3}\sqrt{1-4m}} \Delta l + \frac{4a\Delta m}{l\sqrt{3}(1-4m)^{1,5}}$$

эту формулу можно записать в виде величин относительных отклонений функции и ее аргументов:

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = \frac{\Delta a}{a} - \frac{\Delta l}{l} + \frac{2\Delta m}{(1-4m)} \quad (4.6)$$

Можно представить эту формулу в виде

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = C_i \frac{\Delta x_i}{x_i} = C_1 \frac{\Delta a}{a} + C_2 \frac{\Delta l}{l} + C_3 \frac{\Delta m}{m} \quad (4.7)$$

Максимально возможная относительная погрешность величины K_m равна сумме относительных погрешностей аргументов, что определит верхнюю границу возможных величин отклонений

$$C_1 = 1, C_2 = -1, C_3 = \frac{2m}{m}.$$

Отклонение параметров «а» и «l» имеют различные знаки, но при оценке возможных отклонений функции следует принимать наиболее неблагоприятный случай, когда $\Delta a > 0, \Delta l < 0$ и эти отклонения суммируются.

Пусть, например, $\frac{\Delta a}{a} = 0,08; \frac{\Delta l}{l} = -0,06$, тогда в наихудшем случае эти величины следует суммировать и наибольшее возможное отклонение $\frac{\Delta K_m}{K_m}$,

вызванное такими колебаниями и Δa и Δl , будет равным $0,08 + 0,06 = 0,14$. Если коэффициенты C_1 и C_2 - величины постоянные, то коэффициент C_3 - зависит от параметра « m », например, если $m = \frac{1}{6}$, то $C_3 = 1$, а с увеличением « m » параметр C_3 возрастает и при $m \rightarrow 0,25$ $C_3 \rightarrow \infty$. График функции $C_3(m)$ приведен на рис. 4.1 и видна тенденция к увеличению возможных колебаний кривизны с увеличением нагрузки.

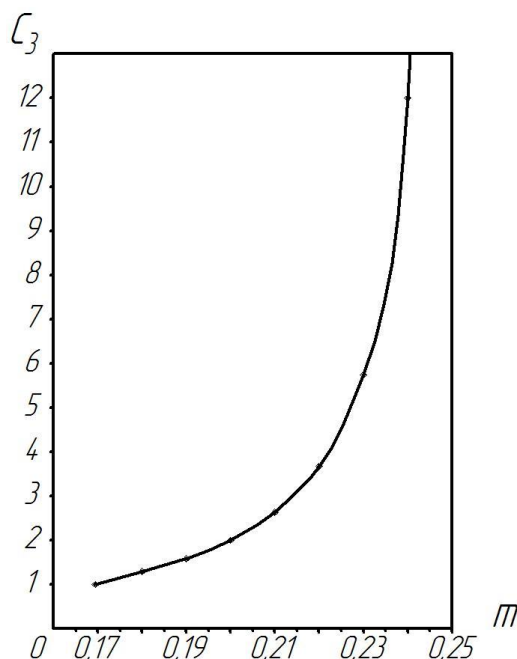


Рисунок 4.1 – График функции $C_3(m)$, при расчете величин $\frac{\Delta K_m}{K_m}$

Возможная погрешность резко возрастает с приближением параметра « m » к его предельной величине, равной $m = 0,25$ для идеального упругопластического материала.

Теперь оценим возможные отклонения величины остаточной кривизны, следуя формуле (4.4). Поскольку

$$\Delta K_0 = \frac{\partial K_0}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial K_0}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial K_0}{\partial m} \Delta m,$$

то возможная величина отклонения ΔK_0 равна:

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

(исследования процесса упругопластического изгиба выполнены совместно с аспирантом А.А.Кутузовым [130]).

Можно использовать формулу аналогичную (4.7), в которой

$$\frac{\Delta K_0}{K_0} = C_1 \frac{\Delta a}{a} + C_2 \frac{\Delta l}{l} + C_3 \frac{\Delta m}{m} \quad (4.8)$$

$$C_1 = 1, C_2 = -1,$$

$$C_3 = \frac{4 - 12\sqrt{3}(1-4m)^{1,5}}{(2 - 12m\sqrt{3}\sqrt{1-4m})(1-4m)} \quad (4.9)$$

График $C_3(m)$ приведен на рисунке 4.2

$$C_3 = \frac{2 - 6\sqrt{3}(1 - 4m)^{1,5}}{1 - 6m\sqrt{3}\sqrt{1 - 4m}} \frac{1}{1 - 4m}$$

и при $m \rightarrow \frac{1}{4} C_3 \rightarrow \frac{2}{1-4m} \rightarrow \infty$.

Если же $m \rightarrow \frac{1}{16}$, то получим неопределенность, но можно показать, что и в этом случае $C_3 \rightarrow \infty$.

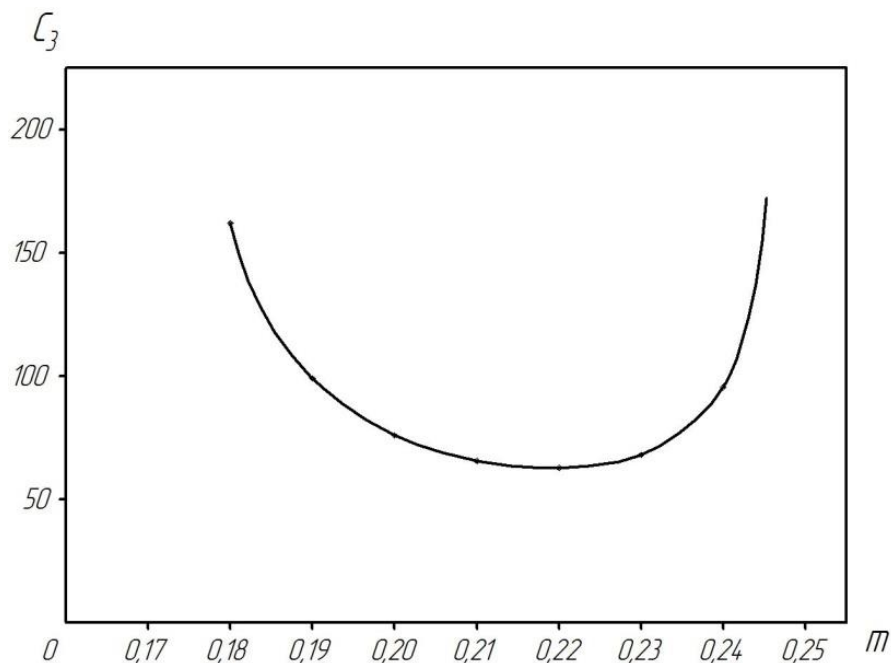


Рисунок 4.2 – График функции $C_3(m)$ для величины остаточной кривизны K_0

Видно, что эта функция $C_3(m)$ имеет минимум при $m = 0,225$, но величины C_3 значительные и небольшое отклонение параметра нагрузки

$\frac{\Delta m}{m}$ порядка $0,01 \div 0,02$ может вызвать погрешность в величинах остаточной кривизны в 50 -100 раз выше, т.е. до $1 \div 2$. При этом следует использовать не линейные соотношения (4.5), а приращение функции.

Рассмотрим оценку возможных изменений безразмерных параметров a и m . Поскольку

$$a = \frac{\sigma_T l}{Eh}, \text{ то } \Delta a = \frac{\partial a}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_T + \frac{\partial a}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial a}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial a}{\partial h} \Delta h$$

или

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\partial \sigma_T}{\sigma_T} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta E}{E} - \frac{\Delta h}{h} \text{ и, например, если}$$

$$\frac{\Delta \sigma_T}{\sigma_T} = 0,05; \frac{\Delta l}{l} = 0,05; \frac{\Delta E}{E} = -0,02; \frac{\Delta h}{h} = -0,02, \text{ то получим } \frac{\Delta a}{a} = 0,14.$$

Второй безразмерный параметр, характеризующий нагрузку, равен

$$m = \frac{Pl}{4\sigma_T b h^2} \text{ и } \frac{\partial m}{\partial P} = \frac{m}{P}; \frac{\partial m}{\partial l} = \frac{m}{l}; \frac{\partial m}{\partial \sigma_T} = -\frac{m}{\sigma_T}, \frac{\partial m}{\partial b} = -\frac{m}{b}; \frac{\partial m}{\partial h} = -\frac{2m}{h}.$$

Поэтому относительное отклонение параметра m равно:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta \sigma_T}{\sigma_T} - \frac{\Delta b}{b} - \frac{2}{h} \Delta h \quad (4.10)$$

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 величин относительного отклонения параметра " m " будет равной $\frac{\Delta m}{m} = 0,17$.

Разумеется – это так называемая верхняя оценка возможного относительного отклонения. Она определена исходя из наиболее неблагоприятного сочетания отклонений.

Приняв значения $\frac{\Delta a}{a} = 0,14$ и $\frac{\Delta m}{m} = 0,17$, а $\frac{\Delta l}{l} = 0,05$ определим по формуле (4.7) относительное отклонение максимальной величины кривизны K_m .

Эта величина при $m = 0,2$ будет равна:

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = 0,14 + 0,05 + \frac{2 \cdot 0,2}{0,2} 0,17 = 0,53$$

Следовательно, возможны значительные колебания величины кривизны.

Что касается величины остаточной кривизны, определяемой согласно формулам (4.8) и (4.9), то при $m = 0,2$ коэффициент C_3 равен:

$$C_3 = \frac{2 - 6\sqrt{3}(1 - 4m)^{1,5}}{1 - 6m\sqrt{3}\sqrt{1 - 4m}} \cdot \frac{1}{1 - 4m} = 76,43,$$

а относительное изменение кривизны весьма значительно:

$$\frac{\Delta K_0}{K_0} = 0,14 + 0,05 + 76,43 \cdot 0,17 = 13,2.$$

Эта величина на порядок выше, чем относительные изменения максимальной кривизны, т.е. $\frac{\Delta K_0}{K_0} \gg \frac{\Delta K_m}{K_m}$.

Рассмотрим схему изгиба заготовки двумя равными силами $0,5P$ по схеме согласно рис. 4.3.

Такая схема изгиба была предложена и исследована при выполнении работы [132].

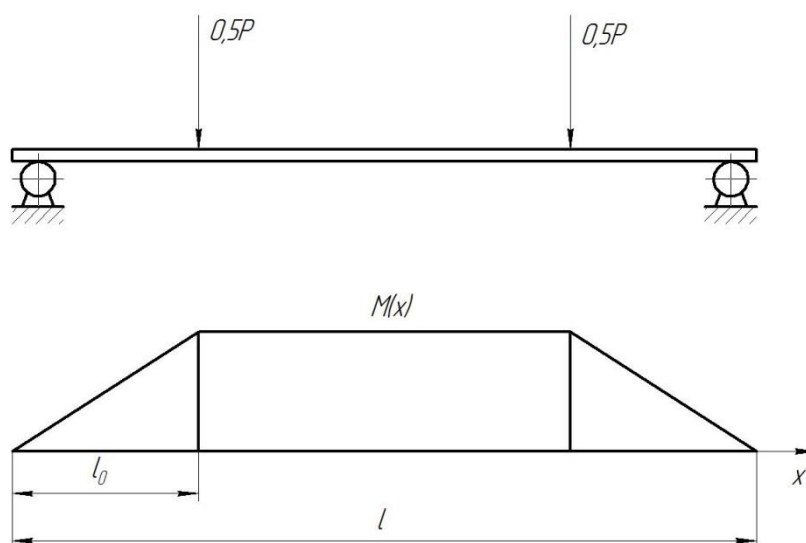


Рисунок 4.3 – Схема изгиба заготовки двумя равными силами и эпюра $M(x)$

В этом случае изгибающий момент и кривизна являются постоянными на длине $l - 2l_0$ при $l_0 < x < l - l_0$.

Величина кривизны при нагрузке равна

$$K_m = \frac{2a}{l\sqrt{3}\sqrt{1-8m\frac{l_0}{l}}},$$

а относительное изменение этой величины определено величинами

$$\frac{\partial K_m}{\partial a} = \frac{K_m}{a},$$

$$\frac{\partial K_m}{\partial l} = -\frac{K_m}{l} \frac{1-4m\frac{l_0}{l}}{1-8m\frac{l_0}{l}}, \quad \frac{\partial K_m}{\partial l} = \frac{4K_m \cdot m}{l(1-8m\frac{l_0}{l})}; \quad \frac{\partial K_m}{\partial m} = \frac{4K_m \cdot \frac{l_0}{l}}{(1-8m\frac{l_0}{l})};$$

или аналогично предыдущим расчетам

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = C_1 \frac{\Delta a}{a} + C_2 \frac{\Delta l}{l} + C_3 \frac{\Delta m}{m} + C_4 \frac{\Delta l}{l} \quad (4.11)$$

где $C_1=1$; $C_2 = -1$; $C_3 = \frac{4l_0}{l(1-8m\frac{l_0}{l})}$; $C_4 = \frac{4l_0}{l(1-8m\frac{l_0}{l})}$

Приведем данные расчетов при $\frac{l_0}{l} = 0,15$ величин $C_3(m)$ и $C_4(m)$, а для сравнения приведем здесь же результаты расчетов коэффициента C_3 для случая нагружения изгибаемой заготовки одной силой (при $\frac{l_0}{l} = 0,5$).

Таблица 4.1- Значения коэффициентов C_3 и C_4

Параметр m	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
Коэффициент C_3 при $\frac{l_0}{l} = 0,15$	0,77	0,79	0,82	0,84	0,87	0,90	0,94
Коэффициент C_3 при $\frac{l_0}{l} = 0,5$	1,29	2,0	3,67	12	-	-	-
Коэффициент C_4 при $\frac{l_0}{l} = 0,15$	0,085	0,16	0,18	0,20	0,23	0,25	0,28

Если, например, $m = 0,22$, то $C_3 = 0,82$, а $C_4 = 0,18$ и согласно формуле (4.11)

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = \frac{\Delta a}{a} - \frac{\Delta l}{l} + 0,82 \frac{\Delta m}{m} + 0,18 \frac{\Delta l}{l},$$

а если $\frac{\Delta a}{a} = 0,10$; $\frac{\Delta l}{l} = -0,03$; $\frac{\Delta m}{m} = 0,5$; $\frac{\Delta l}{l} = 0,03$, то получим

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = 0,10 + 0,03 + 0,41 + 0,0054 = 0,545$$

следовательно, при $K_m = 1\text{м}^{-1}$. Практически возможны колебания кривизны заготовки в диапазоне $(0,5 - 1,5)\text{м}^{-1}$.

Рассмотрим величины погрешностей остаточной кривизны при изгибе по схеме рисунка 4.3.

Остаточная кривизна на участке постоянной кривизны будет величиной постоянной и равной

$$K_0 = \frac{a}{l} \left[\frac{2}{\sqrt{3} \sqrt{1 - 8m \frac{l_0}{l}}} - 24m \frac{l_0}{l} \right] \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial K_0}{\partial l} = \frac{K_0}{l \left(1 - 8m \frac{l_0}{l}\right)} \frac{4m \frac{l_0}{l} - 1 + 12\sqrt{3} m \frac{l_0}{l} \left(1 - 8m \frac{l_0}{l}\right)^{1,5}}{1 - 12\sqrt{3} m \frac{l_0}{l} \sqrt{1 - 8m \frac{l_0}{l}}}$$

$$\frac{\partial K_0}{\partial m} = K_0 4 \frac{l_0}{l} \frac{\left[1 - 3\sqrt{3} \left(1 - 8m \frac{l_0}{l}\right)^{1,5}\right]}{\left[1 - 12\sqrt{3} m \frac{l_0}{l} \sqrt{1 - 8m \frac{l_0}{l}}\right]} \frac{1}{\left(1 - 8m \frac{l_0}{l}\right)}$$

$$\frac{\partial K_0}{\partial a} = \frac{K_0}{a}$$

Производная $\frac{\partial K_0}{\partial l_0}$ равна

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

Относительное изменение остаточной кривизны равно

$$\frac{\Delta K_0}{K_0} = C_1 \frac{\Delta a}{a} + C_2 \frac{\Delta l}{l} + C_3 \frac{\Delta m}{m} + C_4 \frac{\Delta l_0}{l_0}$$

т.е. по-существу, в виде формулы (4.11), но коэффициенты C_i отличаются от величин определенных для процесса нагрузки.

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 1; C_2 = \frac{4m\frac{l_0}{l}-1+12\sqrt{3}m\frac{l_0}{l}(1-8m\frac{l_0}{l})^{1,5}}{(1-8m\frac{l_0}{l})\left(1-12\sqrt{3}m\frac{l_0}{l}\sqrt{1-8m\frac{l_0}{l}}\right)}; \\
 C_3 &= \frac{4m\frac{l_0}{l}\left[1-3\sqrt{3}\left(1-8m\frac{l_0}{l}\right)^{1,5}\right]}{(1-8m\frac{l_0}{l})\left(1-12\sqrt{3}m\frac{l_0}{l}\sqrt{1-8m\frac{l_0}{l}}\right)}; \\
 C_4 &= \frac{4m\frac{l_0}{l}\left[1-3\sqrt{3}\left(1-8m\frac{l_0}{l}\right)^{1,5}\right]}{(1-8m\frac{l_0}{l})\left(1-12\sqrt{3}m\frac{l_0}{l}\sqrt{1-8m\frac{l_0}{l}}\right)} \quad (4.13)
 \end{aligned}$$

В формулах (4.13) коэффициенты C_3 и C_4 равны.

Приведем примеры расчетов при $\frac{l_0}{l} = 0,10$; $\frac{l_0}{l} = 0,15$; $\frac{l_0}{l} = 0,20$.

Если $\frac{l_0}{l} = 0,10$; $m = 1,2$;

то $K_0 = 0,78\frac{a}{l}$; $C_1 = 1$; $C_2 = -1,15$; $C_3 = C_4 = -0,46$ и 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 $\frac{\Delta a}{a} = 0,10$; $\frac{\Delta l}{l} = -0,03$; $\frac{\Delta m}{m} = 0,15$;

$$\frac{\Delta l_0}{l_0} = -0,03; \quad \frac{\Delta K_0}{K_0} = 0,10 + 0,035 + 0,07 + 0,014 = 0,22$$

Предельная величина для упругой деформации равна $m_{min} = \frac{l}{12l_0}$ и при этом $K_0 = 0$, а $\frac{\Delta K_0}{K_0} \rightarrow \infty$. Когда пластическая деформация и ее остаточная величина стремятся к нулю, ее колебания могут быть очень большими.

Максимальная же величина нагрузки равна $m_{max} = \frac{l}{8l_0}$ и при этом $K_0 \rightarrow \infty$, а также C_2, C_3 и C_4 - стремятся к бесконечности.

Результаты расчетов коэффициентов $C_1 - C_4$ при различных величинах "m" и значениях $\frac{l_0}{l} = 0,10$; $\frac{l_0}{l} = 0,15$; $\frac{l_0}{l} = 0,20$ приведены в

таблице 4.2, а также на рис. 4.4; 4.5 и 4.6. В таблице 4.3 кроме коэффициентов C_2 , $-C_4$ приведены и величины $\frac{K_0 l}{a} - m$ – т.е. характеристики остаточной кривизны деформируемой заготовки.

Таблица 4.2 – Расчетный интервал значений m_{min} и m_{max} для построения графиков функций $-C_2(m)$; $C_3(m) = C_4(m)$

$\frac{l_0}{l}$	0,10	0,15	0,20
m_{min}	0,833	0,556	0,467
m_{max}	1,25	0,833	0,625

При малых величинах $\frac{l_0}{l}$ зависимости $|C_2(m)|$ и $|C_3(m)|$ близки к линейным и можно принять

$$|C_2| \approx 1 + 1,5m; |C_3| = |C_4| \approx 0,2 + 2,5m;$$

Графики функций $(-C_2)$, $C_3 = C_4$ при изгибе двумя силами приведены на рис. 4.4 при $\frac{l_0}{l} = 0,1$ и на рис. 4.5 при $\frac{l_0}{l} = 0,20$.

В таблице 4.3 приведены оптимальные диапазоны изменения параметра « m ».

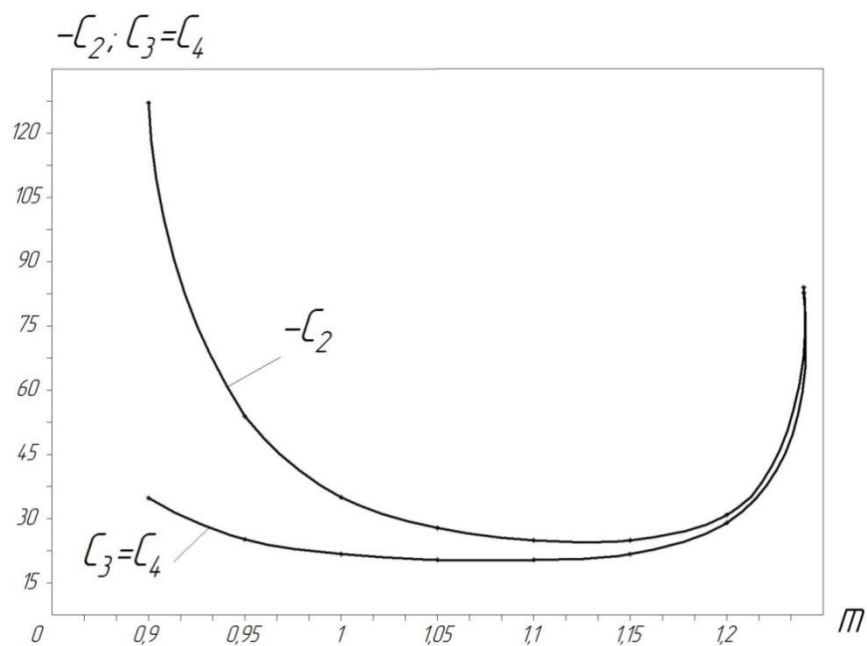


Рисунок 4.4. – Графики функций $-\zeta_2(m); \zeta_3(m) = \zeta_4(m)$ при величине $\frac{l_0}{l} = 0,15$ для схемы изгиба заготовки двумя равными силами

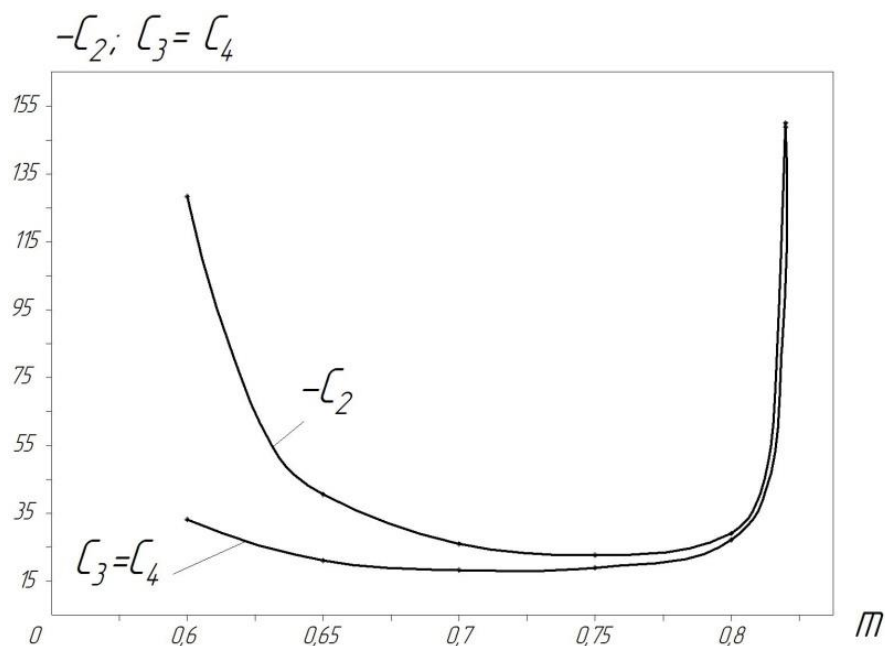


Рисунок 4.5 – графики функций $-\zeta_2(m); \zeta_3(m) = \zeta_4(m)$ при величине $\frac{l_0}{l} = 0,20$ для схемы изгиба двумя равными силами $0,5P$

Таблица 4.3.- Оптимальные диапазоны изменения параметра «m» для повышения точности размеров деформируемой заготовки

$\frac{l_0}{l}$	0,10	0,15	0,20
m	1,05...1,17	0,70...0,80	0,51...0,55

Величины C_2 , C_3 и C_4 по модулю существенно возрастают при $\frac{l_0}{l} > 0,15$ и это возрастание существенно усиливается с увеличением нагрузки, (а следовательно и величины кривизны).

Если при $m = 0,20$ с увеличением $\frac{l_0}{l}$ в два раза от 0,10 до 0,20 C_2 по абсолютному значению, величина C_2 возрастает от $|C_2| = 1,14$ до 1,55, т.е. 1,36 раза, а параметр $|C_3|$ от 0,40 до 1,14 – в 2,85 раз, то при $m = 0,36$ такое же возрастание параметра $\frac{l_0}{l}$ приводит к увеличению $|C_2|$ в 18 раз, а $|C_3|$ - в $\frac{11,55}{1,16} \approx 10$ раз.

Чем выше степень деформации при изгибе, тем выше погрешности и тем ниже точность размеров, полученных заготовок. При $\frac{l_0}{l} = 0,5$ – т.е. при переходе к изгибу одной силой, приложенной в середине длины заготовки, точность ее размеров резко снижается.

Расчеты показывают, что изгиб двумя силами, приложенными на расстояниях l_0 от опор деформируемой заготовки при $\frac{l_0}{l} < 0,15$ существенно предпочтительнее изгиба одной силой, приложенной в центре длины заготовки. С увеличением $\frac{l_0}{l}$ более 0,15 степень возможных колебаний величины кривизны резко возрастает. Поэтому следует предпочесть изгиб двумя силами при $\frac{l_0}{l} = 0,10 - 0,12$. Увеличение усилий в этих случаях оправдано, так как обеспечивается значительное повышение точности деформируемых заготовок.

Были проведены экспериментальные исследования зависимости прогиба от усилий. Опыты проводили на прессах усилиями 0,25 МН и 0,50 МН с измерением прогибов индикаторами. При каждой величине усилия и соответствующего ей безразмерного параметра нагрузки m , опыты повторяли шесть раз, после чего определяли величины математического ожидания прогиба ν и дисперсию, а по ее величине – среднеквадратичную ошибку σ_k . Интервал $3\sigma_k$ определяет с высокой вероятностью, равной 0,997 интервал возможных колебаний величин прогибов.

Пример серии опытов по измерениям прогибов листа $b = 0,5$ м, $h = 4 \cdot 10^{-2}$ м при $l = 1$ м, (для листов из углеродистой стали при $\sigma_T = 260 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$) приведен в таблице 4.4, а данные по величинам математического ожидания, дисперсий, величин средних квадратичных ошибок в таблице 4.5.

Но обработку экспериментальных данных проводили не только по способу оценки интервалов, соответствующих «трем среднеквадратичным отклонениям», но также и по методу Стьюдента[128], при котором определяли параметр S :

$$S = \sqrt{\frac{\sum(v-v_m)^2}{n \cdot (n-1)}}.$$

Метод Стьюдента имеет преимущество, что при его использовании учитывается количество опытов.

Таблица 4.4 – Экспериментальные данные по измерениям прогибов заготовки сечением $b = 0,5$ м, $h = 4 \cdot 10^{-2}$ м длиной пролета $l = 1$ м (углеродистая сталь $\sigma_T = 260 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$)

Величина усилия Р, кН	140	139	140	141	140	140
Параметр нагрузки, m	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Прогиб, ν_m , м	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Величина усилия Р, кН	165	166	165	167	165	165

Параметр нагрузки, m	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Прогиб, v_m , м	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$
Величина усилия Р, кН	183	183	182	183	183	183
Параметр нагрузки, m	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Прогиб, v_m , м	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$
Величина усилия Р, кН	200	205	201	198	200	201
Параметр нагрузки, m	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Прогиб, v_m , м	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$
Величина усилия Р, кН	208	208	209	208	209	208
Параметр нагрузки, m	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Прогиб, v_m , м	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$

Например, при величине $P = 140$ кН; $S = 0,086$ и числе опытов $n = 6$, и доверительной вероятности $\alpha = 0,999$; функция $t_\alpha = 6,86$ [128]. Отклонение равно $\varepsilon = t_\alpha \cdot S = 6,086 \cdot 0,089 = 0,59$, поэтому интервал разброса данных составляет: $v = (5,1 \pm 0,59) \cdot 10^{-3}$ м.

В таблице 4.5 приведены данные по дисперсии и средней квадратичной ошибке, (для результатов, приведенных в таблице 4.4).

Таблица 4.5 – Величины математического ожидания и дисперсий для данных, приведенных в таблице 4.1

Усилие Р, кН	140	166	183	200	208
Параметр, m	0,17	0,20	0,22	0,24	0,25
Математическое ожидание v_m , м	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$7,37 \cdot 10^{-3}$	$8,72 \cdot 10^{-3}$	$11,78 \cdot 10^{-3}$
Дисперсия D_v	0,044	0,08	0,123	0,078	0,16
Средняя квадратичная ошибка σ_k , м	0,21	0,28	0,35	0,28	0,4

По данным этих таблиц доверительные интервалы $\pm 3\sigma_v$ равны:
при $P = 140$ кН; $m = 0,17$; $v = (5,10 \pm 0,63) \cdot 10^{-3}$ м;

$$P = 166 \text{ кН}; m = 0,20; v = (6,5 \pm 0,84) \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$P = 183 \text{ кН}; m = 0,22; v = (7,37 \pm 1,05) \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$P = 200 \text{ кН}; m = 0,24; v = (8,72 \pm 0,84) \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$P = 208 \text{ кН}; m = 0,25; v = (11,78 \pm 1,2) \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Видно, что интервалы достигают 10-15%.

При использовании метода Стьюдента при $P = 166$ кН; параметр $S = 0,12$; $t_{\alpha} = 6,86$ и, следовательно, $\varepsilon = 0,80$; $v = (6,5 \pm 0,80) \cdot 10^{-3}$ м.

При $P = 183$ кН; $S = 0,143$; $t_{\alpha} = 6,86$ и т.д. $\varepsilon = 0,98 \sim 1$;

$$v = (7,37 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

При $P = 208$ кН; $S = 0,162$; $t_{\alpha} = 6,86$ и т.д. $\varepsilon = 1,11$; $v = (1,11 \pm 1) \cdot 10^{-3}$ м.

Таким образом, были определены доверительные интервалы при обычном «правиле трех сигм» и при использовании теории Стьюдента. Эти данные представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Анализ экспериментальных данных при изгибе заготовки $b = 0,5$ м; $h = 4 \cdot 10^{-2}$ м длиной пролета $l = 1$ м (углеродистая сталь $\sigma_T = 260 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$)

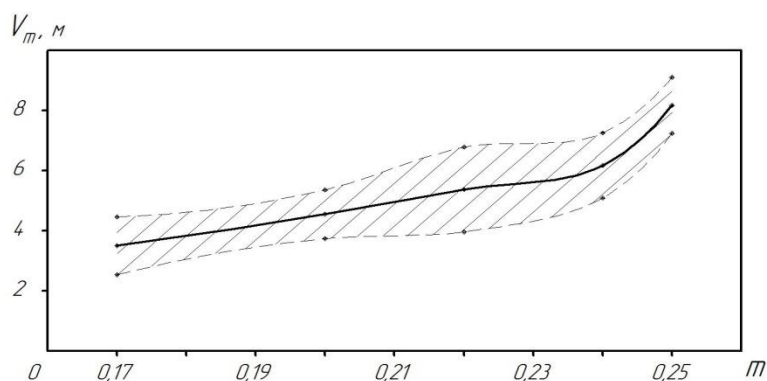
Усилие P, кН	140	166	183	200	208
Прогиб, математическое ожидание v_m ,	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$7,37 \cdot 10^{-3}$	$8,72 \cdot 10^{-3}$	$11,78 \cdot 10^{-3}$
Доверительные интервалы по правилу 3σ	$(5,1 \pm 0,63) 10^{-3}$	$(6,5 \pm 0,84) 10^{-3}$	$(7,37 \pm 1,05) 10^{-3}$	$(8,72 \pm 0,84) 10^{-3}$	$(11,78 \pm 1,2) 10^{-3}$
Доверительные интервалы по Стьюденту	$(5,1 \pm 0,59) 10^{-3}$	$(6,5 \pm 0,80) 10^{-3}$	$(7,37 \pm 1) 10^{-3}$	$(8,72 \pm 0,78) 10^{-3}$	$(11,78 \pm 1,2) 10^{-3}$

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, весьма

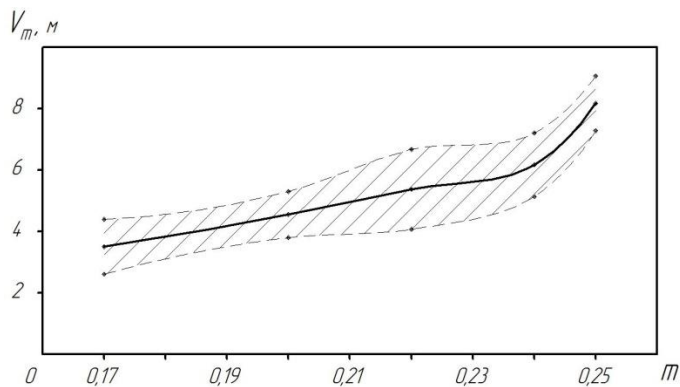
высокой) близки и изменяются в интервале $(0,6 \div 1,2) \cdot 10^{-3}$, т.е. погрешность достигает 12%.

Аналогичные опыты проводили при изгибе листов шириной $b = 0,25\text{м}$, $h = 4 \cdot 10^{-2}\text{м}$ и опыты дали близкие результаты к приведенным выше.

Для иллюстрации на рис. 4.6 приведены графики зависимости прогиба от параметра « m » с интервалами, соответствующими возможным отклонениям по методу Гаусса (трем среднеквадратичным ошибкам) – рис. 4.6а и по способу Стьюдента – рис. 4.6б.



а



б

Рисунок 4.6 – Зависимость прогиба v_m от параметра нагрузки m , при изгибе листа сечением 60×600 мм; а – при обработке экспериментальных данных по методу Гаусса; б – при обработке экспериментальных данных по методу Стьюдента

Видно, что эти данные удовлетворительно согласуются между собой и оба характеризуют увеличение разброса данных при увеличении параметра нагрузки « m ».

4.2 Определение точности кривизны заготовок, изготавливаемых деформацией изгиба

Как уже отмечено выше, главной задачей для нас является не повышение точности величин прогибов деформируемой заготовки, а повышение точности ее кривизны. Именно точность этого параметра во многом определяет качество полученных изделий.

Между тем, методов прямого измерения кривизны нам неизвестно, поэтому при проведении экспериментальных исследований использовали косвенный способ определения кривизны с определением первой и второй производных функции $y(x)$, описывающей прогиб, методом конечных разностей.

Экспериментальные исследования были проведены на стенде, разработанном НИИПТМАШ, рис.4.7. На плиту 1, выставленную с помощью уровня на измерительном стеллаже, устанавливали опорную раму 2, на которой были расположены индикаторы 3. Их измерительные штифты расположены в прорези, выполненной в раме 2, (что иллюстрирует вид по стрелке А). Деформированную заготовку 4 устанавливали на плиту 5 и фиксировали прижимной планкой 6 с помощью болтов 7. Усилие прижима выбирали малым с тем, чтобы оно только фиксировало положение заготовки 4, (но не было бы достаточным для ее деформации). Шаг расположения индикаторов составляет 20мм, (их циферблаты на рисунке показаны ориентированными в плоскости рисунка, но фактически их ориентировали в перпендикулярных плоскостях для возможности уменьшения расстояний между ними, равных Δx). Если показания индикатора с номером i равно y_i , а с номером $i + 1$: y_{i+1} , то

приближенное выражение для производной в конечных разностях (в точке с номером i) можно записать в виде «конечной разности»:

$$\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x}.$$

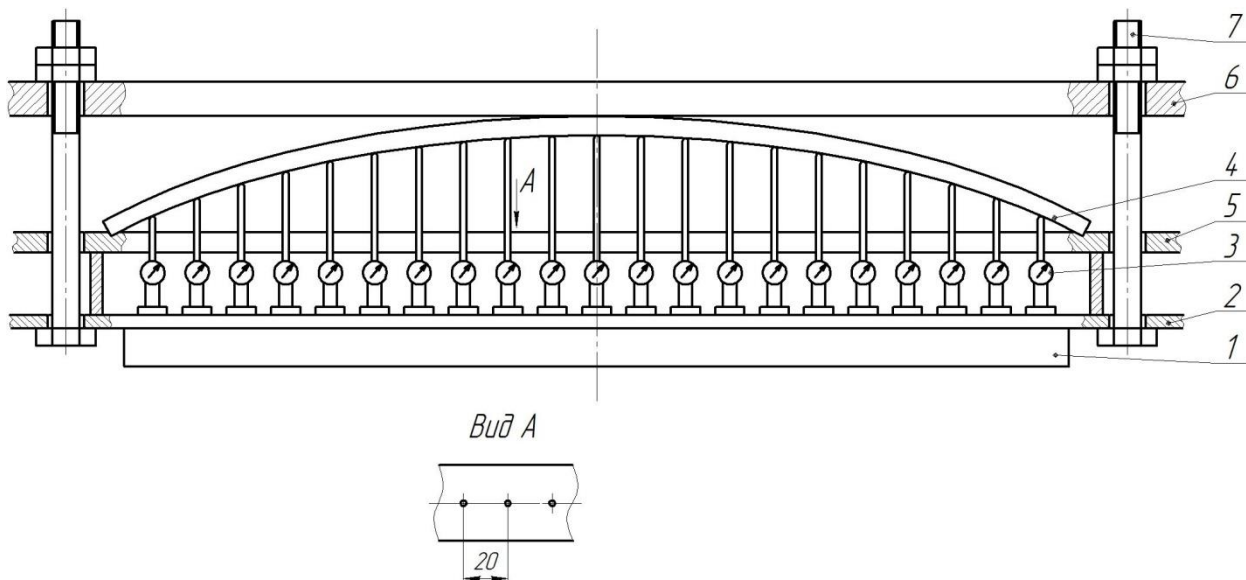


Рисунок 4.7 – Схема измерения прогибов листа

Аналогичное выражение для точки $(i - 1)$ можно записать в виде

$$\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_{i-1} = \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x}.$$

Теперь можно записать приближенное выражение для второй производной в конечных разностях

$$\frac{\Delta^2 y}{\Delta x_i^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x_i^2},$$

что позволяет получить приближенное выражение для кривизны в конечных разностях

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

или

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

Приведем пример при $\Delta x = 20$ мм; $y_i = 62$ мм; $y_{i-1} = 61$ мм; $y_{i+1} = 64$ мм;

$$\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_i = \frac{64-62}{20} = 0,1;$$

$$\frac{\Delta^2 y_i}{\Delta x_i^2} = \frac{64 - 2 \cdot 62 + 61}{400} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$$

Приближенное значение характеристики кривизны

$$K_i = 2,5 \cdot 10^{-3} (1 + 0,01)^{-1,5} = 2,488 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$$

Известно много методов измерения координат точек поверхностей листового металлопроката, например, [95], а также [97÷102], но все они сложны и не дают возможности точного определения величин кривизны.

В качестве примера приведем результаты измерений участка стального листа толщиной 4 мм и радиусом 400 мм, (при его ширине 200 мм). В таблице 4.7 приведены данные для половины симметричного листа.

Таблица 4.7 – Результаты измерений координат y_i участка листа номинальным радиусом 400 мм ($\Delta x = 20$ мм) (при $x=200$ мм, $y = 1,13$ мм)

Координата точки измерения, мм	0	20	40	60	80
Показания y_i , мм	5,35	5,31	5,15	4,90	4,55
Характеристика кривизны K , мм ⁻¹	-	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$
Координата точки измерения, мм	100	120	140	160	180
Показания y_i , мм	4,11	3,56	3,11	2,55	1,89
Характеристика кривизны K , мм ⁻¹	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

Видно, что колебания характеристики кривизны значительны, они реализуются в пределах $(2,25...3,0) \cdot 10^{-4}$ мм.

Конечно, величину K нельзя считать точным значением кривизны, поскольку интервалы $\Delta x = 20$ мм достаточно велики. Однако их можно использовать, как приближенные характеристики для оценки стабильности и изменения величины кривизны по данной поверхности.

Для плоской поверхности листа возможные отклонения от «плоскостности» определяются стандартами, см. [153].

Учитывая, что измеренные и определенные по формулам «конечных разностей», величины не точно определяют кривизну поверхностей, будем называть их не «величинами кривизны», а «характеристиками кривизны».

Более точных характеристик кривизны добиться в реальных условиях не представляется возможным.

Были проведены опыты с изгибом стальных листов, причем с различными листами (из одной партии металла) при размерах $h = 0,02$ м; $b = 0,2$ м; $l = 1$ м все листы нагружали одним и тем же усилием $P = 18,3$ кН, приложенным в центре ее длины.

Экспериментальные данные по 10 опытам при одном и том же усилии деформации приведены в таблице 4.8.

Математическое ожидание величины прогиба равно

$$V_m = 12,55 \cdot 10^{-3}, \Delta K = 4,52 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1},$$

а дисперсия

$$D_{\text{пр}} = 0,2028; D_{\text{кр}} = 0,2284$$

Среднеквадратичное отклонение равно $\sigma_{\text{кр}} = 0,48$.

Таблица 4.8 – Данные по величинам прогибов и остаточной кривизны (в середине длины листа после изгиба и разгрузки) (нагружение одной силой в центре длины заготовки)

Номер опыта	1	2	3	4	5
Максимальный прогиб, м	$12,1 \cdot 10^{-3}$	$13,2 \cdot 10^{-3}$	$12,8 \cdot 10^{-3}$	$11,9 \cdot 10^{-3}$	$12,5 \cdot 10^{-3}$
Максимальная характеристика кривизны, m^{-1}	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$
Номер опыта	6	7	8	9	10
Максимальный прогиб, м	$12,9 \cdot 10^{-3}$	$12,1 \cdot 10^{-3}$	$12,8 \cdot 10^{-3}$	$13,0 \cdot 10^{-3}$	$12,2 \cdot 10^{-3}$
Максимальная характеристика кривизны, m^{-1}	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$

Произведем расчет по методу Стьюдента, рассчитаем случайную функцию S : $S = 142$. Задаемся вероятностью $\alpha = 0,99$, по таблице Стьюдента, учитывая количество опытов $n = 10$, находим значение $t_{\alpha} = 3,25$.

Определяем половину интервала $\Delta \varepsilon$

$$\Delta \varepsilon_{\text{пр}} = 0,46 \text{ кН}; \Delta \varepsilon_{\text{кр}} = 0,49 \text{ кН}$$

В данном случае для материала стального листа с показателем прочности и жесткости: $\sigma_T = 260 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$; $E = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$; $P = 18,3 \text{ кН}$ параметр нагрузки равен $m = 0,22$.

Далее, в таблицах 4.9 и 4.10 приведены данные экспериментальных замеров по аналогичным параметрам ($b = 0,2\text{м}$; $h = 0,02\text{м}$; $l = 1\text{м}$; $\sigma_T = 260 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$; $a = 6,5 \cdot 10^{-2}$) при нагрузках $P = 15 \text{ кН}$; $m = 0,19$ - таблица 4.9 и при тех же параметрах и $P = 20\text{кН}$, $m = 0,24$.

Таблица 4.9 – Экспериментальные данные по величинам прогибов и кривизны при изгибе заготовки усилием 15 кН ($m = 0,19$)

Номер опыта	1	2	3	4	5
Максимальный прогиб, м	$12,5 \cdot 10^{-3}$	$10,5 \cdot 10^{-3}$	$10,9 \cdot 10^{-3}$	$11,3 \cdot 10^{-3}$	$10,5 \cdot 10^{-3}$
Максимальная характеристика кривизны, m^{-1}	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Номер опыта	6	7	8	9	10
Максимальный прогиб, м	$10,1 \cdot 10^{-3}$	$11,5 \cdot 10^{-3}$	$11,5 \cdot 10^{-3}$	$12,4 \cdot 10^{-3}$	$10,8 \cdot 10^{-3}$
Максимальная характеристика кривизны, m^{-1}	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$

Математическое ожидание равно для прогиба $v_m = 11,2 \cdot 10^{-3}$ м, а для параметра $K = 1,36 \cdot 10^{-2} m^{-1}$.

Среднеквадратичные отклонения будут равны:

для прогиба - $\sigma_{пр} = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м; для кривизны $0,49 \cdot 10^{-2} m^{-1}$.

По методу Стьюдента для прогиба $\Delta\varepsilon_{пр} = 0,81$ кН; $\Delta\varepsilon_{кр} = 0,507$ кН – интервал равен $2,0 \cdot 10^{-3}$ м; а для кривизны - $0,6 \cdot 10^{-3} m^{-1}$.

Математическое ожидание для прогиба равно $v_m = 17,28 \cdot 10^{-3}$ м, а для параметра кривизны $K = 38,8 \cdot 10^{-2} m^{-1}$.

Были проведены опыты по определению остаточных величин характеристик кривизны K после изгиба стальных листов толщиной 10 мм и шириной 200 мм. Сначала изгиб осуществляли одной силой P , приложенной в центре длины заготовки, (равной $l = 0,8$ м), причем усилия изменяли от величины $m = 0,15 - 0,17$, до предельной величины, близкой к максимальной равной $m_{max} = 0,25$, (при $\sigma_T = 260 \frac{МН}{м^2}$; и $E = 2 \cdot 10^{-5} \frac{МН}{м^2}$;

$l = 0,8$ м, параметр $m = \frac{P \cdot 0,6}{4 \cdot 260 \cdot 0,2 \cdot 10^{-4}} = 28,8P$). Усилие изменяли от 5 кН до 10 кН и на основании этих данных был построен график величины изменения относительной погрешности $\frac{\Delta K_0}{K_0}$ остаточной кривизны, представленной на рисунке 4.8.

Таблица 4.10 - Экспериментальные данные по величинам прогиба и кривизны при изгибе стальной заготовки усилием 20 кН ($m = 0,24$)

Номер опыта	1	2	3	4	5
Максимальный прогиб, м	$16,5 \cdot 10^{-2}$	$19,0 \cdot 10^{-2}$	$15 \cdot 10^{-2}$	$19,8 \cdot 10^{-2}$	$18,1 \cdot 10^{-2}$
Максимальная характеристика кривизны, m^{-1}	$33,2 \cdot 10^{-2}$	$45,0 \cdot 10^{-2}$	$41,2 \cdot 10^{-2}$	$35,5 \cdot 10^{-2}$	$37,6 \cdot 10^{-2}$
Номер опыта	6	7	8	9	10
Максимальный прогиб, м	$20,1 \cdot 10^{-2}$	$11,5 \cdot 10^{-2}$	$21,8 \cdot 10^{-2}$	$16,5 \cdot 10^{-2}$	$14,5 \cdot 10^{-2}$
Максимальная характеристика кривизны, m^{-1}	$31,5 \cdot 10^{-2}$	$50,1 \cdot 10^{-2}$	$38,9 \cdot 10^{-2}$	$30 \cdot 10^{-2}$	$45 \cdot 10^{-2}$

Область, соответствующая разбросу экспериментальных данных, на рис. 4.8 заштрихована. Видно, что даже в оптимальном, (с точки зрения повышения точности величин кривизны), диапазоне $m = 0,20 \div 0,23$ погрешность может достигать 25-40%

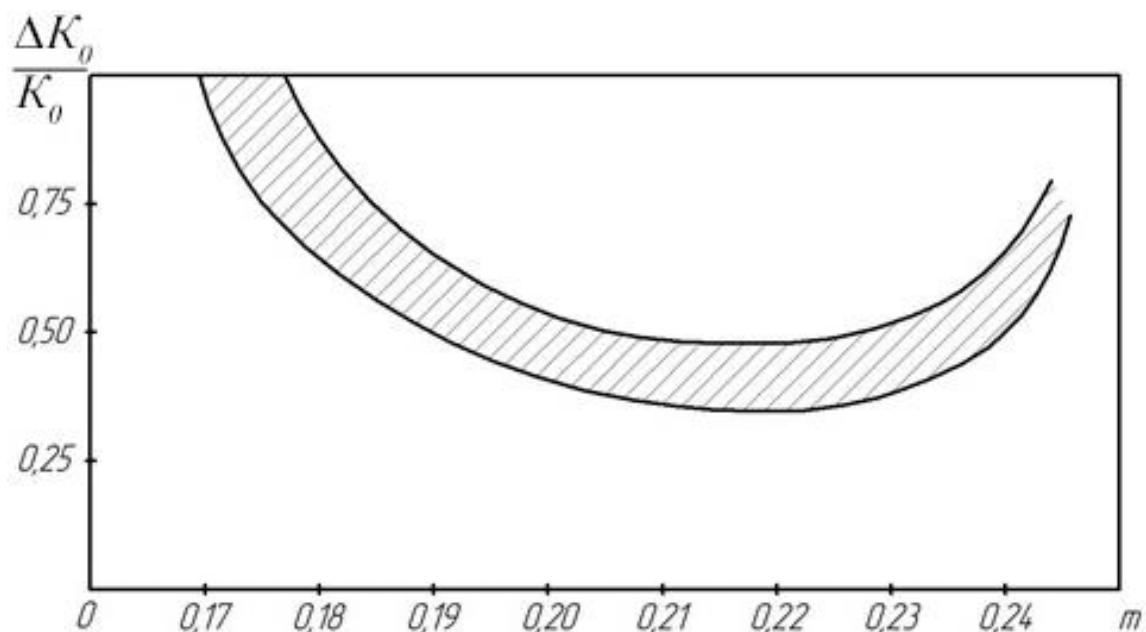


Рисунок 4.8 – График изменения относительной величины остаточной кривизны при изгибе одной силой ($\frac{l_0}{l} = 0,5$)

С приближением к максимальной величине, равной 0,25 она возрастает до 55 ÷ 65% и более, но еще более сильно точность снижается с уменьшением нагрузки и с приближением усилия к минимальной величине, соответствующей параметру $m = 0,167$. Затем провели опыты с деформацией тех же листов двумя усилиями по схеме соответственно рис.4.9.

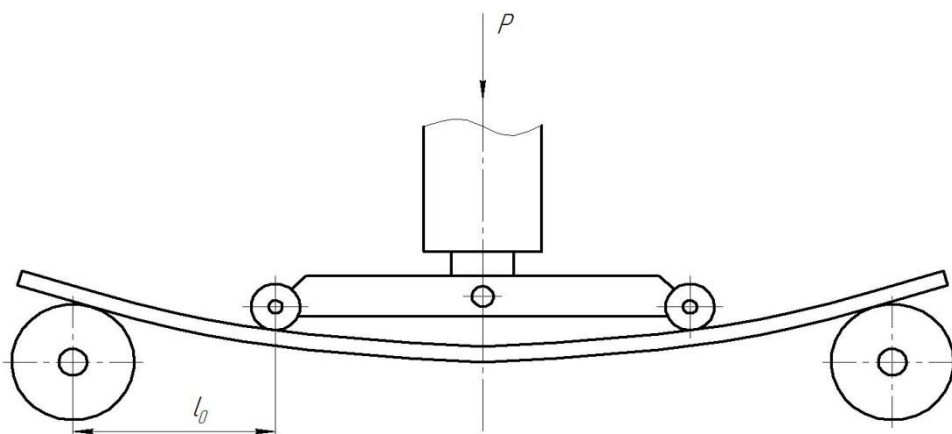


Рисунок 4.9 – Схема проведения опытов с нагружением заготовки двумя усилиями, равными $0,5P$

Опыты провели при $l_0 = 0,15l$ и $l_0=0,10l$ и в первом случае диапазон изменения параметра « m » определен минимальной величиной $m_{min} = 0,556$ и $m_{max} = 0,833$, т.е. усилие $P_{min} = \frac{0,556 \cdot 4 \cdot 260 \cdot 0,2 \cdot 10^{-4}}{0,6} = 19,3 \text{ кН}$, а наибольшая величина $P_{max} = \frac{0,833 \cdot 4 \cdot 260 \cdot 0,2 \cdot 10^{-4}}{0,6} = 28,9 \text{ кН}$. График характеризующий разброс данных по величинам относительных значений остаточной кривизны, приведен на рис.4.10. Опыты выполняли на прессе усилием 100 кН.

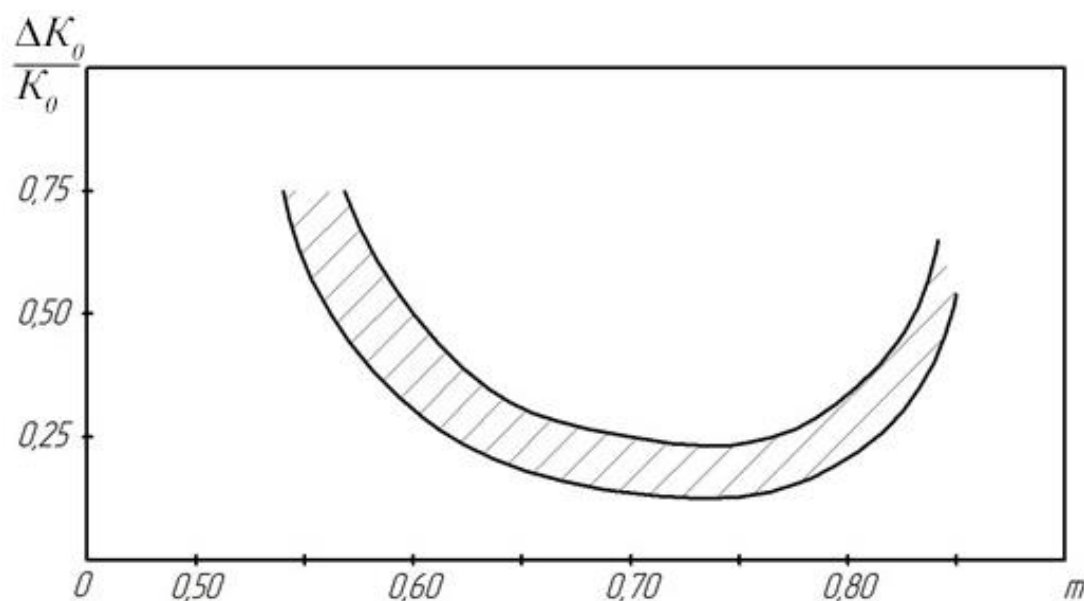


Рисунок 4.10 – График изменения относительной величины остаточной кривизны при изгибе заготовки двумя равными силами

$$\left(\frac{l_0}{l} = 0,15\right)$$

На рис.4.11 показан аналогичный график при $\frac{l_0}{l} = 0,10$, когда $m_{min} = 0,833$, $m_{max} = 1,25$, (и величина $P_{min} = 28,9 \text{ кН}$, а $P_{max} = 43,4 \text{ кН}$).

Опыты показывают, что оптимальные диапазоны усилий для повышения точности кривизны и уменьшения диапазона колебаний этой величины для величины $\frac{l_0}{l} = 0,10$ соответствуют интервалы $m = 0,95 \div 1,15$,

а при $\frac{l_0}{l} = 0,15$, $m = 0,70 \div 0,80$, что близко к данным, приведенным на рис.4.9.

На точность заготовок оказывает влияние зависимость напряжения от деформации, т.е. функция $\sigma(\varepsilon)$. При изгибе заготовок из алюминия область разброса величин прогибов и остаточной кривизны значительно меньше, (в 1,5 – 1,9 раз), чем при изгибе стальных заготовок.

Установлено существенное влияние упрочнения металла на точность заготовок, изготовляемых деформацией изгиба.

Если осуществляют изгиб из наклепанного материала, например, стали 08Ю и предел текучести изменяется незначительно, (для идеально-пластического материала он является в некоторой области степенью постоянной деформации), то в этих условиях точность величин остаточной кривизны (и прогибов) резко снижается. Причиной этого является то, что из-за неизбежной разнотолщинности листа, (т.е. колебаний размера h), пластическая деформация при изгибе начнется и будет в основном происходить именно на участках меньшей толщины. Понятно, что на этих участках ее величина будет значительной, а на участках большей толщины изменения кривизны будет малым, (оно может быть равным нулю).

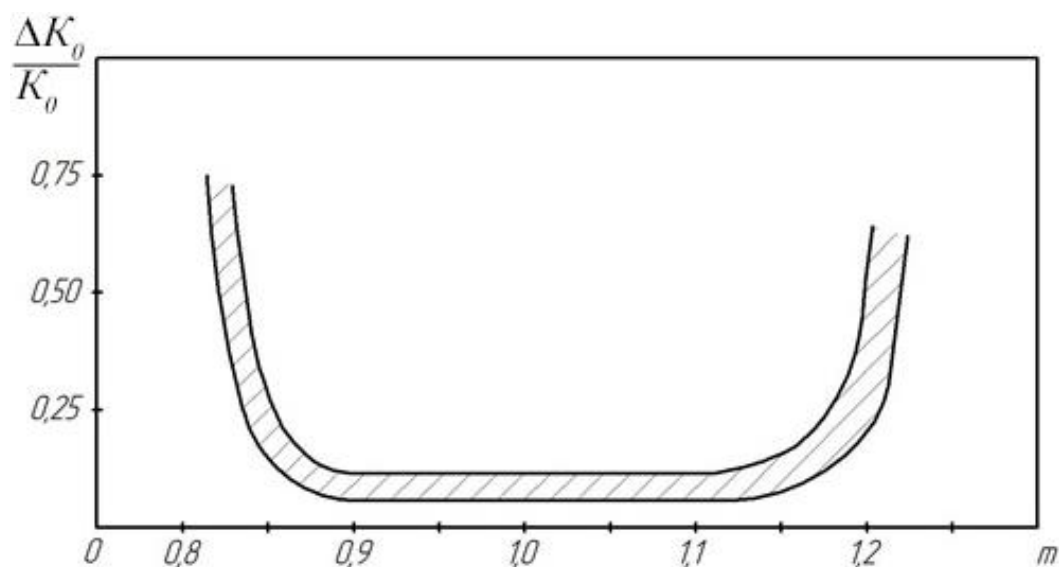


Рисунок 4.11 – График изменения относительной величины остаточной кривизны при изгибе двумя равными силами ($\frac{l_0}{l} = 0,10$)

Наихудшие условия деформации изгиба имеют место при сочетании двух неблагоприятных факторов: высокой разнотолщинности, и низкого упрочнения, (например, стали после отжига), когда при ее растяжении наблюдается «площадка текучести», где $\sigma = const$. Если, например, участок меньшей (из-за разнотолщинности) толщины расположен в центре длины, то возможны случаи, когда практически вся деформация изгиба сосредоточена вблизи этого участка, рис.4.11.

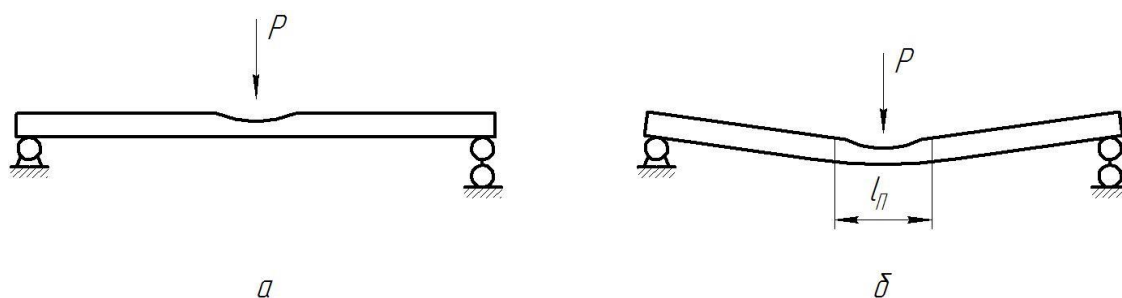


Рисунок 4.12 – Схема деформации изгиба листа с низким упрочнением и участком уменьшенной толщины

На рис. 4.12 показана конфигурация изгиба до начала деформации – рис. 4.11а и после изгиба – рис. 4.12б. Практически вся деформация сосредоточена на участке уменьшенной толщины (рис. 4.12б), где она достигает $\Delta K = (40 \div 50) \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$, а по остальной длине остаточная кривизна равна нулю, (или близка к нему и $\Delta K = (1 \div 3) \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$). Поэтому диапазон разброса по длине оказывается очень большим, а точность низкой.

4.3. Особенности процесса деформации при подгибке в штампах кромок кольцевых заготовок

В связи с широким применением технологического процесса изготовления деформацией изгиба кольцевых заготовок таких, как трубы, бандажи, возникла необходимость рассмотреть особенности деформации кромок таких заготовок.

Их получают деформацией в процессе «пошагового изгиба», схема которого иллюстрируется рис. 4.13. Заготовку длиной l (рис. 4.13а) деформируют усилием P , приложенным с помощью ролика, а после деформации изгиба осуществляют разгрузку и перемещают деформированную заготовку на определенное расстояние: шаг перемещения. Можно, конечно, осуществлять нагрузку давлением пуансона, как показано на рис. 4.13б. Из эпюры изгибающих моментов, рис. 4.13б видно, что при нагружении одной силой P , момент является максимальным в центре длины заготовки, (а при нагружении двумя равными силами в центре заготовки находится зона постоянного изгибающего момента. Но в обоих случаях вблизи опор деформируемой заготовки имеются участки длиной $l_1 = \frac{l}{12m}$, в которых пластическая деформация невозможна (рис. 4.13а).

Поскольку предельная величина безразмерного параметра $m = \frac{1}{4}$, то минимальная длина этой зоны $l_1 = \frac{l}{3}$. При этом $\frac{2}{3}$ длины заготовки останутся прямолинейными.

Поэтому при пошаговой формовке пуансоном каждый шаг перемещения не должен быть больше $\frac{1}{3}$ расстояния между опорами. При этом $\frac{2}{3}$ длины заготовки останутся прямолинейными. Поэтому при пошаговой формовке пуансоном каждый шаг перемещения заготовки не должен быть больше $\frac{l}{3}$, но лучше его принимать равным $(0,15 - 0,20)l$. Чем меньше величина пошагового перемещения, тем выше точность размеров кольцевой заготовки (но, как следствие, выше себестоимость продукции).

Понятно, что увеличение числа операций («шагов») увеличивает время технологического процесса изготовления изделия.

Обеспечить однородность и стабильность степени деформации по всему периметру заготовки оказывается невозможным, что иллюстрирует рис. 4.14.

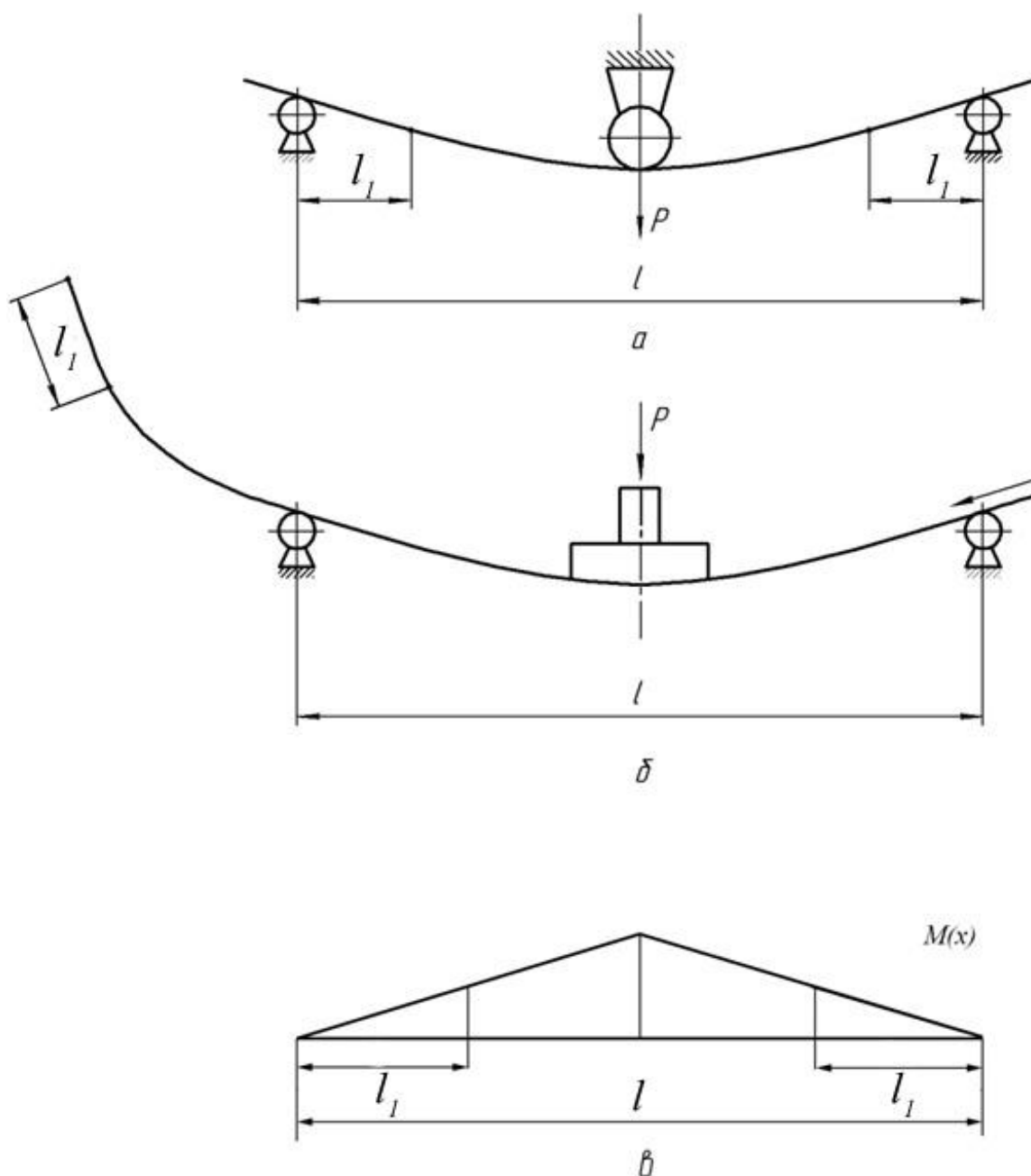


Рисунок 4.13 - Схема деформации изгиба заготовки:

а - изгиб роликом; б – изгиб пуансоном; в – эпюра изгибающих
МОМЕНТОВ

При пошаговой формовке после завершения процесса останутся прямолинейные прямолинейными плоские участки АС и ВС длиной l_1 у переднего и заднего концов заготовки. Если эти плоские участки

сохранятся до момента сварки концов заготовки, то ухудшится качество кольцевого изделия. Для сортовых кольцевых заготовок, используемых в машиностроении, например, для изготовления бандажей – это не столь существенно, так как далее сваренные бандажи подвергаются механической обработке.

Однако, при изготовлении труб большого диаметра (1020 – 1420 мм) наличие плоских участков сильно снижает их округлость – различие в величинах диаметров трубы может достигать 8 – 15 мм. Поэтому для повышения качества округлости после сборки (сварки) трубы используют операцию экспандирования, при которой воздействием на внутреннюю поверхность трубы цилиндрическими сегментами увеличивают диаметр и округлость полученных труб.

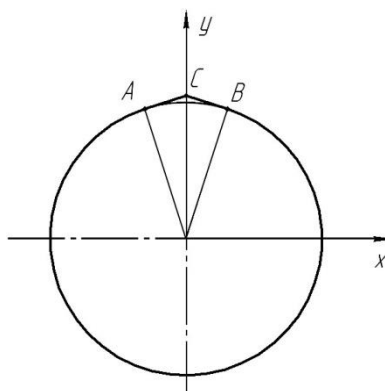


Рисунок 4.14 – Конфигурация заготовки после окончания формовки

Однако приложение усилий вблизи зон, расположенных около границ прямолинейных участков – зон А и В, указанных на рис.4.14, приводит к реализации пластической деформации вблизи зоны сварного шва, обозначенной буквой С на рис. 4.14.

В случае значительных напряжений растяжения это может привести к появлению микротрещин в этих зонах. Также существенным является и наличие остаточных напряжений после формовки (изгиба) стальной заготовки. Для газопроводов с трубами диаметрами 1420 мм из стали категории Х70 большинство разрушений наблюдается на участках,

расположенных на расстоянии 200 мм от продольного сварного шва [148]. При этом трубы с двумя продольными швами имеют не два плоских участка, как показано на рис. 4.14, а четыре, поэтому возможность появления дефектов при экспандировании в два раза выше. В связи с этим качество двухшовных труб ниже, чем одношовных.

Для предотвращения стресс-коррозии в ряде случаев рекомендуют подвергать трубы отпуску при температуре 250-300⁰С в течение 2ч. Нагрев снижает остаточные напряжения, но, естественно, не устраняет возникшие при изготовлении микротрещины или микрорасслоения. Кроме того, такой нагрев связан с высоким расходом энергии – до 1,8-2,0 МДж на 1т труб, что повышает их стоимость. Учитывая значительную длину труб (до 12-18м) расход энергии будет еще в два – три раза больше. Поэтому при производстве труб большого диаметра первой технологической операцией формовки трубной заготовки является подгибка ее кромок на кромкогибочном прессе, когда края заготовки зажимаются между пуансоном и матрицей. Только после этого идет формовка внутренней части стальной заготовки на трубоформовочном прессе. Следует отметить, что конфигурация инструмента не одинакова у различных технологических схем производства труб. При изготовлении труб по схеме JCOE фирмы SMS Meer профиль пуансона кромкогибочного пресса выполнен по эвольвенте [134], а по схеме UOE – по двух- или трехрадиусной кривой.

Ниже рассмотрена однорадиусная схема формовка концевых участков заготовок при сжатии их между штампами пресса, что часто используется на практике. Экспериментальные данные по величинам усилий прессов такого режима изгиба довольно редки в научной литературе. Исходное положение концевого участка заготовки на рис. 4.15 показано пунктиром. При работе сначала верхний штамп 1 соприкасается с линией А, а затем поворачивает этот участок с огибанием поверхности нижнего штампа 2.

При сближении штампом заготовка 3 деформируется до приобретения кривизны $\varepsilon = \frac{1}{R}$ постоянной по периметру штампов. Определим величину усилия прессования, приняв следующие определяющие параметры: R, m ; $\sigma_T, \text{МПа}$; b, m ; l, m ; P, H .

Из них можно составить четыре безразмерных параметра:
 $A_1 = \frac{l}{R}$; $A_2 = \frac{h}{l}$; $A_3 = \frac{b}{R}$; $A_4 = \frac{P}{\sigma_T b l}$.

Зависимость указанных шести переменных должна иметь общий вид
 $F(A_1, A_2, A_3, A_4) = 0$.

Если решить ее относительно A_4 , то получим

$$P = \sigma_T b l \cdot f(A_1, A_2, A_3) \quad (4.14)$$

Так как принято, что усилие пропорционально ширине листа, то $f(A_1, A_2, A_3)$ не зависит от параметра A_3 . Поэтому формула (4.14) имеет вид

$$P = \sigma_T b l \cdot f\left(\frac{h}{l}, \frac{l}{R}\right) \quad (4.15)$$

Если принять приближенное кинематически допустимое поле скоростей в полярных координатах r, θ, z в виде

$$v_r = 0, v_\theta = Cgr(r - R), v_z = -Cz(r - R)$$

где C - постоянная; v_r, v_θ, v_z - компоненты вектора скорости.

Компоненты тензора скоростей деформации выразятся как

$$\varepsilon_r = \frac{\partial v_r}{\partial r} = 0, \varepsilon_\theta = \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = C(r - R);$$

$$\varepsilon_z = -C(r - R).$$

Соответствующие компоненты деформации сдвига будут

$$\gamma_{rg} = \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} = 0, \gamma_{rz} = \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} = -Cz,$$

$$\gamma_{rg} = \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} = C\theta r,$$

а второй инвариант тензора скоростей деформаций равен

$$H = \sqrt{\frac{2}{3} [(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2] + \gamma_{r\theta}^2 + \gamma_{rz}^2 + \gamma_{\theta z}^2}$$

В данном случае после расчетов получим

$$H = 2C\sqrt{(r - R)^2 + 0,25 + (z^2 + \theta^2 r)}$$

Мощность формоизменения равна

$$N = \int_{-0,5b}^{0,5b} dz \int_{-0,5a}^{0,5a} d\theta \int_{R-0,5h}^{R+0,5h} \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} H r dr$$

При угловой скорости изгиба (скорости изменения угла α) ω имеем

$$C = \frac{2\omega}{Ra} = \frac{2\omega}{l} = const$$

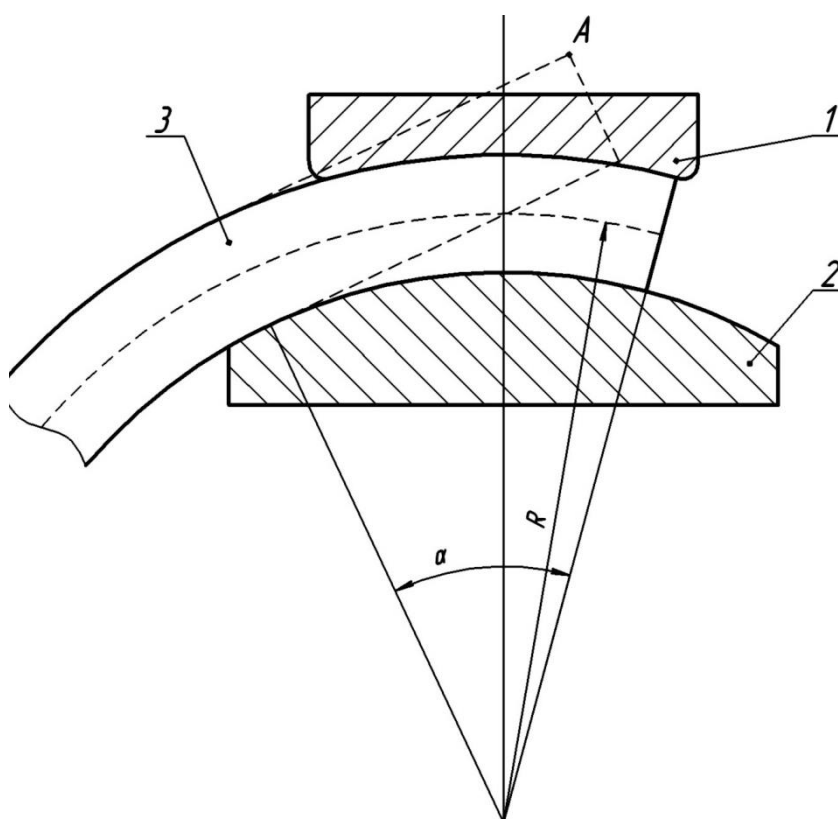


Рисунок 4.15 – Схема деформации концевых участков заготовки

Численные расчеты интеграла в формуле для величины N_Φ показывает возможность формоизменения в виде формулы:

$$N = \frac{2}{3\sqrt{3}} \sigma_T b h^2 \omega.$$

Пусть τ_0 - время, за которое совершается изгиб, v - скорость штампа. Если приближенно принять

$$\omega = \frac{\alpha}{\tau_0} = \frac{l}{R\tau_0},$$

то с учетом выражения

$$N = p v = \frac{p l \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\tau_0},$$

Можно записать приближенную формулу для усилия:

$$P = \frac{2\sigma_T b h^2}{3\sqrt{3} R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{4\sigma_T b h^2}{3\sqrt{3} l}.$$

Отсюда определяем

$$m = \frac{P l}{4\sigma_T b h^2} = \frac{1}{3\sqrt{3}} = 0,20,$$

что близко к приведенной выше предельной величине $m = 0,25$.

Например, при $\sigma_T = 260$ МПа; $b = 0,6$ м; $h = 4 \cdot 10^{-2}$ м; $R = 1$ м и $l = 0,5$ м усилие изгиба будет равно:

$$P = \frac{4 \cdot 260 \cdot 1,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4}}{3\sqrt{3} \cdot 0,5} = 0,38 \text{ МН}.$$

На прессе усилием 1 МН проводили измерение деформации концевых участков стальных листов с пределом текучести $\sigma_T = 260$ МПа; шириной $b = 0,6$ м; с разной толщиной h ($5 \cdot 10^{-3}$; $10 \cdot 10^{-3}$ и $20 \cdot 10^{-3}$ м, изменяя параметры $l = 0,2 - 0,9$ м и $R = 0,2 - 1,1$ м. В таблице 4.11 приведены экспериментальные данные при величинах $l = 0,9$; $0,4$; и $0,2$ м.

В таблице 4.12 приведены данные измерений усилия при $b = 0,6$ м; $l = 0,4$ м и $h = 4 \cdot 10^{-2}$ м для той же углеродистой стали ($\sigma_T = 260$ МПа).

Математическое ожидание этой величины 409,93 кН, дисперсия равна 21,3 кН². Поэтому средняя квадратичная ошибка составляет 4,62 кН. Следуя «правилу трех квадратичных ошибок», можно полагать, что с

вероятностью 0,997 величина усилия находится в интервале $409,93 \pm 3 \cdot 4,62$ кН (от 396 до 424 кН).

Следует учитывать, что формулы, приведенные выше для определения усилий, могут превышать их величины до 20-25%.

Общие формулы, полученные из анализа размерностей можно на основании проведенных экспериментальных исследований уточнить, например, приняв функцию

$$f\left(\frac{h}{l}, \frac{l}{R}\right) = 0,70 \frac{h^2}{l^2}$$

и получить формулу, в которой f зависит только от параметров.

Таблица 4.11 – Усилия деформации концевого участка заготовки при различных значениях его длины l и толщины h (ширина $b=0,6$ м; предел текучести $\sigma_T=260$ МПа; радиус кривизны $R=1$ м)

Параметр	Значение параметра при $l = 0,9$ м								
$h, \text{мм}$	5			10			20		
№ измерения	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Усилие Р, кН	3,30	3,15	3,08	13,1	12,9	13,4	49,5	52,1	48,7
Параметр	Значение параметра при $l = 0,4$ м								
$h, \text{мм}$	5			10			20		
№ измерения	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Усилие Р, кН	7,08	7,21	29,8	30,1	29,4	110,1	117,7	108,3	
Параметр	Значение параметра при $l = 0,2$ м								
$h, \text{мм}$	5			10			20		
№ измерения	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Усилие Р, кН	14,8	13,9	13,1	59,8	58,3	60,1	235,2	237,4	229,9

Таблица 4.12 – Измеренные значения усилий формовки ($b=0,6$ м; $\sigma_T=260$ МПа; $l = 0,4$ м; $R=1$ м; $h = 4 \cdot 10^{-2}$)

№ измерения	Р, кН	№ измерения	Р, кН	№ измерения	Р, кН
1	410,2	8	417,7	15	412,8
2	405,0	9	418,1	16	401,8
3	409,2	10	415,1	17	414,3
4	403,8	11	412,6	18	408,8
5	408,4	12	416,2	19	410,5
6	404,1	13	414,8	20	403,2
7	406,2	14	411,5	21	409,2

При $\frac{l}{R} < 0,4$ можно использовать другую формулу:

$$f\left(\frac{h}{l}, \frac{l}{R}\right) = 0,70 \frac{h^2}{l^2} + 10^{-5} \frac{R^2}{l^2}$$

Например, при $\frac{h}{l} = 0,05$; $\frac{R}{l} = 5$; $l = 0,2$ м

$$f\left(\frac{h}{l}, \frac{l}{R}\right) = 0,70 \cdot 0,25 \cdot 10^{-2} + 0,025 \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-3}$$

и усилие $P = 260 \cdot 0,6 \cdot 0,2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 62,4$ кН.

С увеличением $\frac{l}{R}$ от 0,2 до 0,4 при той же величине $\frac{h}{l} = 5 \cdot 10^{-2}$ второй член уменьшится до величины, не превышающей 5 % усилия. Отсюда следует, что при формовке труб не следует оставлять слишком короткие $\frac{l}{R} < 0,3 \div 0,4$ плоские участки сечений – их более трудно деформировать изгибом для придания необходимой кривизны.

Следует также учитывать, что расчеты деформации изгиба согласно обычным формулам теории пластичности применимы при изгибе заготовок, неподвижных в процессе изгиба. Заготовки могут перемещаться между отдельными циклами изгибной деформации, но неподвижны при реализации изгиба. Если же заготовки перемещаются во время пластической деформации изгиба, как это происходит обычно на роликоправильных агрегатах, то движение существенно изменяет процесс деформации. В этом случае, даже при симметричной нагрузке, симметрия деформации нарушена ввиду разгрузки в зоне уменьшения изгибающего момента и следует для расчета прогибов и кривизны использовать другие формулы.

По главе 4 можно сделать такие выводы:

1. На основании расчетов и экспериментальных исследований подтверждено существование оптимального, (с точки зрения повышения точности размеров заготовок), интервала усилий.

2. При выборе режимов деформации следует принимать рабочий диапазон усилий в пределах средней трети диапазона от m_{min} до m_{max} , избегая величин более близких к m_{min} или m_{max} , поскольку в обоих крайних диапазонах степень разброса величин остаточной кривизны резко возрастает.

3. Следует указать еще на один фактор, оказывающий существенное влияние на точность размеров, изготавливаемых изгибом. Этот фактор — интенсивность упрочнения деформируемого металла. Как правило, чем меньше интенсивность упрочнения, тем ниже точность, как по величинам прогибов, так и по величинам остаточной кривизны после деформации и разгрузки. При низком упрочнении возникают локальные участки с увеличенной кривизной и вблизи них сосредоточена вся деформация.

4. Опыты показывают, что изгиб двумя силами предпочтительнее, чем изгиб одной силой, приложенной в середине пролета. Усовершенствованная технология изгиба позволяет в 2,0 – 2,5 раза уменьшить разброс величин относительных изменений кривизны и прогибов.

5. При упругопластической (пошаговой) формовке кольцевых заготовок на неподвижных опорах в них остаются плоские участки, которые необходимо дополнительно деформировать на кромкогибочных штампах (прессах) для обеспечения постоянства кривизны заготовки.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗГИБА ЗАГОТОВОК

Исследования, проведенные в отношении точности, реализуемой при изгибе заготовок, изложенные выше, показывают существенные недостатки данного процесса. Эти недостатки оказывают отрицательное влияние на качество полученных заготовок, особенно точность.

Главный недостаток схем изгибной деформации заключается в том, что напряжения существенно изменяются по длине деформируемой заготовки. На первый взгляд, это не является отличительным признаком именно изгибной деформации, поскольку для любого процесса при нагрузке в начальной стадии деформации являются упругими, (до начала пластической деформации). Однако, например, при прокатке стального листа толщиной 10 мм упругие деформации имеют порядок величины $\left(\frac{\sigma_T}{E}\right)$, т.е. при $\sigma_T = 400 \frac{МН}{м^2}$ и $E = 2 \cdot 10^5 \frac{МН}{м^2}$, $\frac{\sigma_T}{E} = 2 \cdot 10^{-3}$ поэтому изменение толщины листа составляет величину порядка 0,02 мм. Такие величины следует учитывать в некоторых случаях, например, при дрессировке, (или прокатке с малыми обжатиями в «прогладочных» проходах).

Но при изгибе неизбежным является существование таких зон (по длине заготовки, и если учитывать малые деформации, то и вблизи нейтральной оси) где деформации до завершения процесса остаются упругими, это обычно участки вблизи опор деформируемых заготовок и в них изменение главного параметра, характеризующего деформацию, - кривизны оси заготовки, равно нулю.

Следовательно, если для процесса прокатки листов, например, толщинами 10мм, можно говорить о колебаниях в пределах $10 \pm 0,02$ мм, то для изгиба диапазон колебаний кривизны обычно определен ее изменением от нуля до максимума, что неизбежно определяет низкую точность данного процесса.

Более того, при изгибе заготовки сосредоточенной нагрузкой, при использовании модели идеально пластической среды зона упругой деформации составляет до $\frac{2}{3}$ общей длины деформируемого ее участка (между опорами).

Все это определяет низкую точность кривизны, обеспечиваемой машинами для изгиба (или для правки) деформируемых заготовок.

Если для прокатки, (ковки или иных аналогичных процессов) можно получать диапазоны размеров, например $10 \pm 0,1$ мм; $50 \pm 0,4$ мм; $2 \pm 0,05$ мм, то характеристики кривизны определяются диапазонами от нулевого значения – до максимума: $0 \div 1,0 \text{ м}^{-1}$; $0 \div 0,5 \text{ м}^{-1}$ и т.д., (отметим, что обычно для нас важна не точность прогиба, а точность величины кривизны, полученной в процессе деформации).

Следует отметить принципиальное отличие процесса изгиба от таких процессов, как прокатка, ковка, волочение и т.д. В указанных процессах размер изделия (поковки, проката и т.д.) определяется положением рабочего инструмента: расстоянием между бойками прессы, расстоянием между валками (межвалковым зазором), размерами волокна и т.д.

Но при изгибе положение инструмента (бойка) определяет перемещение участков заготовки, а это не является основной целью процесса деформации изгиба: целью является обеспечение необходимой кривизны оси заготовки. Этот параметр определен первой и второй производными уравнения оси заготовки.

Для усовершенствования процесса изгиба была разработана новая машина для изгиба заготовок [148,154].

Новая машина включает опорные ролики, (можно выполнить их приводными), а также два гибочных ролика с приводами их перемещения, отличающийся тем, что два гибочных ролика установлены на балке, опертой на шарнир с возможностью вращения относительно оси указанного шарнира, опертого на ползун, соединенный с приводом

перемещения балки, при этом расстояния от оси шарнира до осей обоих гибочных роликов равны.

Кроме того, разработан вариант конструкции, в котором устройство снабжено дополнительной балкой, расположенной параллельно основной балке, опертой на свой шарнир и на данной дополнительной балке установлены два гибочных ролика.

Гибочные ролики, установленные на балке, опертой на шарнир, могут быть снабжены также индивидуальными приводами их вращения.

Кроме того, предложена также конструкция машины, снабженная дополнительной балкой, расположенной параллельно основной балке, опертой на шарнир, соединенной своим приводом и на указанной дополнительной балке установлены два гибочных ролика, что позволяет осуществлять знакопеременный изгиб. Предусмотрена и такая конструкция, в которой два гибочных ролика установленные на балке, опертой на шарнир, снабжены индивидуальными приводами вращения гибочных и опорных роликов.

Новая конструкция машины иллюстрируется рисунком 5.1, на котором показаны деформируемая заготовки 1, кривизну которой следует изменить в процессе деформации изгиба, 2 и 3 – опорные ролики, 4 и 5 – гибочные ролики, установленные на балке 6, опертой на шарнир 7. Балка может перемещаться в вертикальном направлении с помощью привода гидравлического цилиндра 8. Цилиндр укреплен на станине 9 стационарно. Направляющая втулка 10 обеспечивает ориентацию штока цилиндра привода и является ограничителем угла поворота балки 6.

На рисунке 5.2 показан разрез по плоскости АА, (указанной на рисунке 5.1). Здесь видно расположение гибочного ролика в опорах на балке 6.

Существенно, что балка 6 установлена с возможностью вращения относительно оси шарнира 7, что обеспечивает равенство усилий на обоих гибочных роликах -4 и 5.

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, начальной кривизны и других факторов. Именно этот конструктивный признак: расположение роликов 4,5 на балке 6, имеющей возможность вращения на оси 7 позволяет обеспечить постоянство изгибающего момента на длине между роликами.

Следует отметить существенное отличие предложенной конструкции от устройства, предложенного в патенте Японии № 63-227271 (по заявке 2-75419, МКИ В21D7,1990г.). Данное устройство включает и гибочный штамп, и весьма сложные зажимные приспособления. Эксплуатация и настройка такой машины вызывают большие затруднения.

В другой конструкции – по патенту Японии 61-141246 (заявка 2-45926 МКИ 21D1/05) исключены сложные зажимные приспособления, но изгиб осуществляет один гибочный ролик при опоре на два ролика, что приводит к низкой точности деформируемой заготовки.

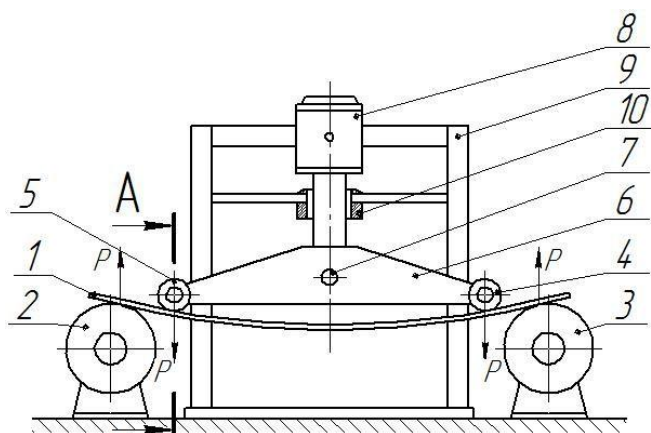


Рисунок 5.1 – Конструкция машины для изгиба заготовок с двумя роликами, установленными на балке, опёртой на шарнир

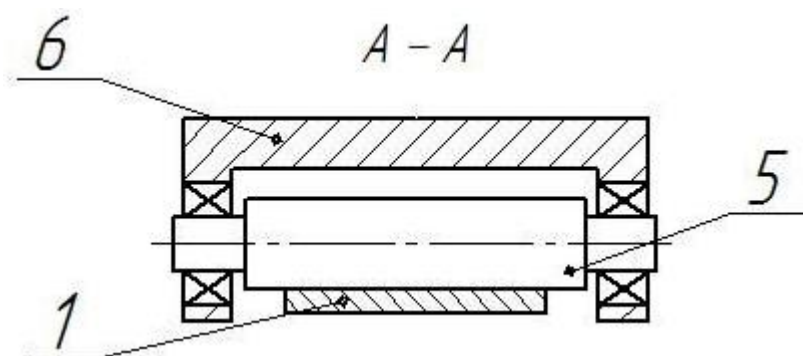


Рисунок 5.2 – Схема расположения гибочного ролика (разрез АА на рисунке 5.6)

На рисунке 5.3 приведены для сравнения две схемы деформации изгиба заготовки. В схеме по рисунку 5.3а изгиб реализуется одной силой, равной P , приложенной в середине пролета, а на рисунке 5.3б – изгиб реализуется двумя силами, равными $0,5P$, приложенными на расстояниях l_0 от опор заготовки. Здесь же показаны и эпюры изгибающих моментов.

Видно, что для схемы по рисунку 5.3а изгибающий момент является величиной переменной по длине деформируемой заготовки. Он является не только «переменной величиной», но «существенно переменной», поскольку изменяется от нуля до максимальной величины, (равной $0,25Pl$).

Привод в виде гидравлического цилиндра 8, укрепленного на станине 9, обеспечивает движение штока в направляющих 10 и нагружение деформируемой заготовки 1 гибочными роликами 4 и 5. Если сначала с заготовкой 1 соприкоснется только один из роликов 4 или 5, то балка 6 будет поворачиваться на оси 7 пока не будет обеспечено равновесие рычага, т.е. условие $P_1 = P_2 = P$.

Именно такой режим изгиба создает в деформируемой заготовке 1 эпюру изгибающих моментов с постоянной величиной момента M на большей части длины заготовки.

Такое устройство с диаметрами опорных роликов 50 мм и гибочных роликов 40 мм при $l=0,5$ м и $l = 10$ м (а также $l_0 = 0,05$ м, и $l_0 = 0,10$ м) было изготовлено в Краматорском НИИПТМАШ. Приспособление в виде рамы

с двумя опорными роликами и траверсу (позиция б на рис. 5.1) соединяли шарниром со стержнем, на который воздействовали усилием P . В качестве нагружающего устройства использовали пресс усилием 0,5 МН. Часть экспериментальных данных приведена в главе 4. Сравнительные графики диапазонов относительного изменения диапазонов остаточной кривизны $\frac{\Delta K_0}{K_0}$ в функции отношения $\frac{m}{m_{max}}$ приведены на рис. 5.4.

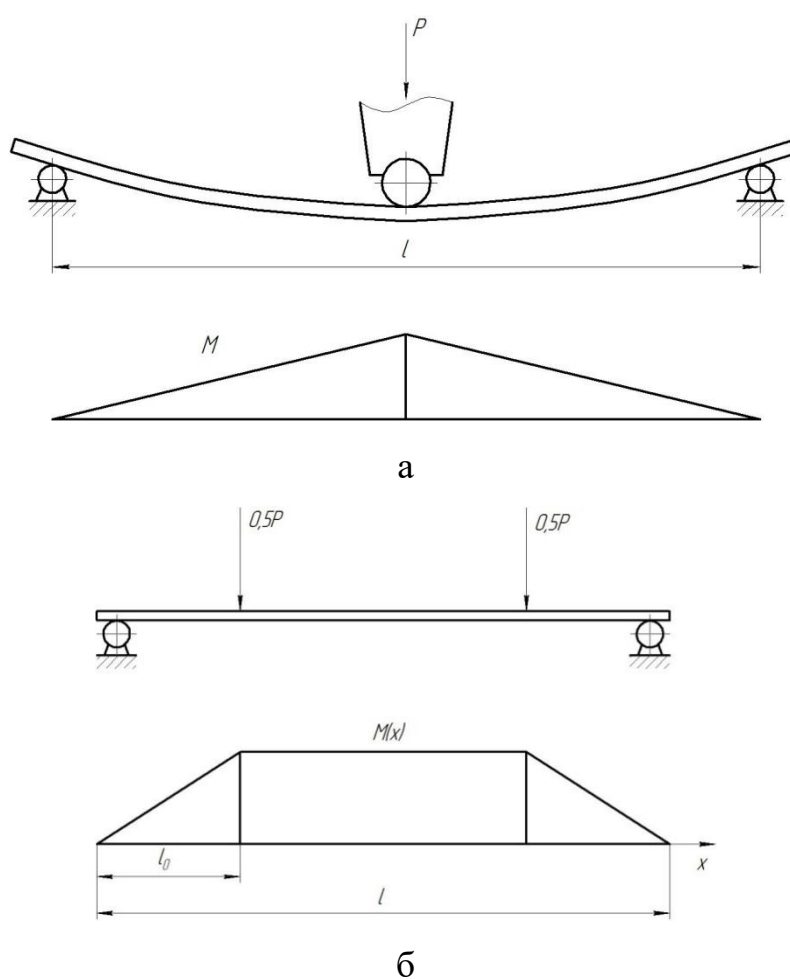


Рисунок 5.3 – Сравнительные схемы деформации изгиба заготовок: а- одной силой, б - двумя силами

Понятно, что максимальные величины m_{max} различные для различных величин l_0 . Диапазон 1 на рисунке 5.4 соответствует обычно используемой схеме с нагружением одной силой (по рис. 5.3а). В этом случае $m_{max} = 0,25$. Диапазон 2 на рис. 5.4 соответствует нагружению двумя равными силами по схеме рис. 5.3б.

Эти данные получены на основе обработки экспериментальных замеров по методике, описанной выше в главе 4, (при $\frac{l_0}{l} = 0,10$).

Видно, что использование новой машины для изгиба обеспечивает уменьшение области разброса величин кривизна в 3-4 раза.

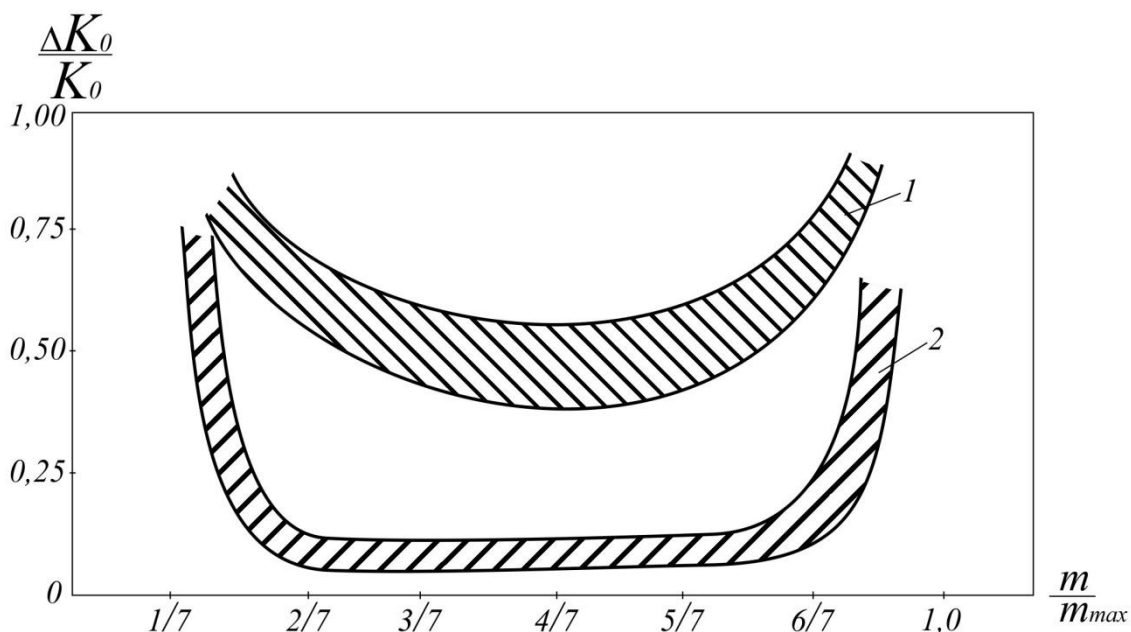


Рисунок 5.4 – Диапазоны изменения параметра $\frac{\Delta K_0}{K_0}$ при использовании двух устройств для изгиба заготовок

Также был разработан вариант [154] конструкции машины, позволяющий реализовать знакопеременный изгиб заготовки с помощью двух балок, установленных, на шарнирах.

Схема такой машины для изгиба заготовки 1 показана на рис. 5.5. Помимо опорных роликов 2,3 и гибочных 4,5, установленных на траверсе

6, (опертой на ось 7 и нагружаемой гидравлическим цилиндром 8, закрепленным в станине 9, имеется балка 11, установленная на оси 12, с роликами 13 и 14.

В этом варианте предусмотрена не одна балка (поз.6 рисунки 5.1 и 5.5), а две балки, дополнительная из которых означена поз.11 на рисунке 5.5.

Эта балка установлена параллельно балке 6, на шарнире 12 и снабжена гибочными роликами 13,14. Имеется привод в виде гидравлического цилиндра 15 для перемещения дополнительной балки. В этом варианте конструкции предусмотрена и вторая пара дополнительных опорных роликов 16,17, рис.5.5.

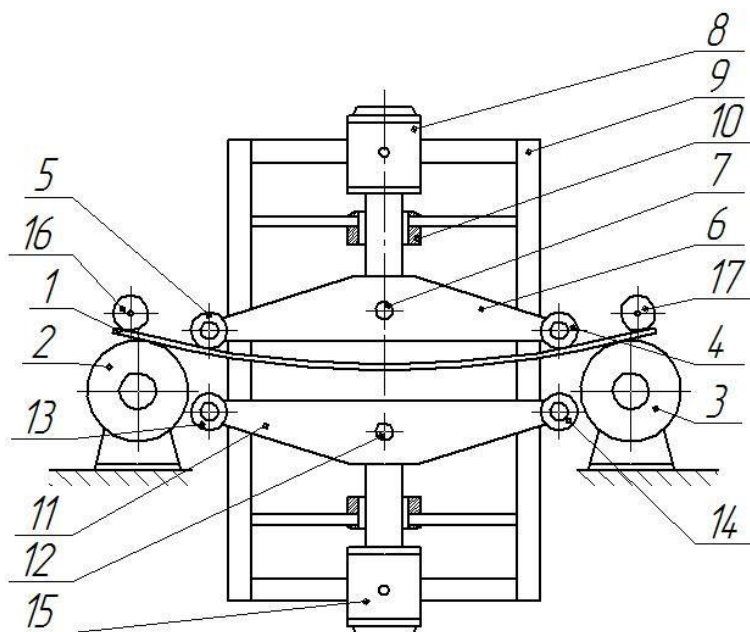


Рисунок 5.5 – Схема для изгиба заготовки в двух противоположных направлениях

В варианте конструкции с приводными гибочными роликами, они снабжены приводами в виде гидравлических двигателей 18, установленных так же, как и гибочные ролики, на балке, опертой на шарнир, рис. 5.6.

Предложенное устройство работает следующим образом. Заготовку 1 можно подвергнуть изгибу, без ее перемещения в процессе изгиба. В этом случае – ее размещают на опорных роликах 2 и 3 см. рис. 5.1(или 5.5).

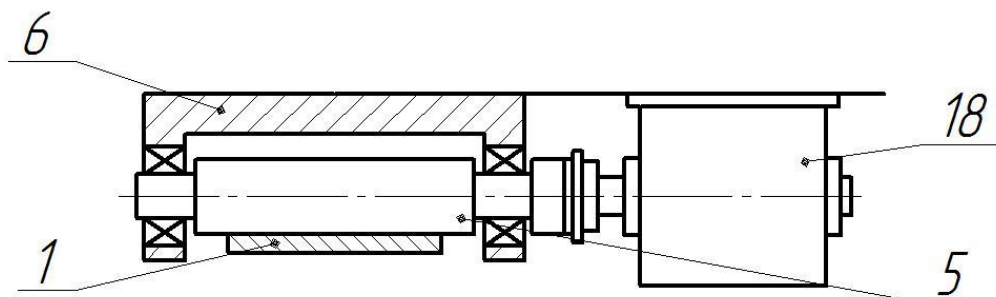


Рисунок 5.6 – Расположение гибочного ролика, снабженного индивидуальным приводом

В некоторых случаях используют знакопеременный изгиб заготовок большой длины, перемещая их через систему опорных и гибочных роликов, причем гибочные ролики совершают возвратно-поступательное движение. Это реализуется при поперечном изгибе заготовки 1 при движении вниз, а затем балка 6 с роликами 4,5 перемещается вверх. При этом вверх перемещаются также ролики 13, 14 с траверсой 11, (установлено 1 на оси 12 – рис. 5.1 или 5.5).

При движении обоих балок 6 и 11 вверх, изгиб реализуют ролики 13, 14 с помощью привода – гидравлического цилиндра 15.

В некоторых случаях деформацию легче осуществить, если гибочные ролики выполнены приводными, например, с приводом в виде гидродвигателей 18 (рис. 5.6). Процесс изгиба с обеспечением постоянной величины изгибающего момента на большей части длины заготовки, между опорными роликами, обеспечивает существенное повышение точности размеров при изгибе заготовок.

Возможно применение данного устройства для изгиба прямолинейных заготовок для придания им необходимой кривизны, а

также и для выпрямления криволинейных заготовок в процессах правки, например, после прокатки, для повышения их качества.

Краматорском НИИПТМАШ были проработаны два варианта конструкции: в первом из них был использован гидравлический привод перемещения траверсы с двумя гибочными роликами. Рычаг шарнирно, как указано выше, размещен на траверсе, соединенной с гидравлическим цилиндром.

При давлении рабочей жидкости 50 МПа и диаметре внутренней полости цилиндра 0,1 м он обеспечивает усилие 400 кН, что достаточно для изгиба и стальных и тем более алюминиевых листов толщиной до 10 мм и шириной до 500 мм.

Краматорском НИИПТМАШ был проработан вариант конструкции гибочной машины с использованием гидравлического привода перемещения гибочного ролика. При этом в проекте использовали гидравлический цилиндр фирмы ЗАО «СДМ Запчасть-Сервис», [151]. Этот гидравлический цилиндр содержит основные детали: буксу – шток, гайку, грязесъемник, а также уплотнения. Уплотнение обеспечивает герметизацию штока и поршня. Увеличение осевых и радиальных нагрузок и давления до (5÷10) МПа привело к необходимости уменьшить зазоры в контактирующих парах поршень-гильза и шток-букса.

Для защиты от загрязнения фирма «СДМ Запчасть-Сервис» предусмотрела дополнительные грязезащитные кольца [151]. Фирма также использует двухслойное покрытие хромом поверхностей штока гидравлического цилиндра. Это покрытие наносят после предварительной закалки поверхности ТВЧ и ее шлифования и полировки. Фирма «СДМ Запчасть-Сервис» указывает, что данные цилиндры выдерживают 2 млн. циклов нагружений (по ТУ 4143-002-49319233-01), что подтверждено опытом эксплуатации гидравлических цилиндров. Однако, был проработан и вариант конструкции гибочной машины с

электромеханическим приводом, (применительно к тем предприятиям, где нет гидравлических приводов каких-либо механизмов и систем гидравлики, поэтому приобретать их только для одной гибочной машины может оказаться нецелесообразным.

Вариант опытно конструкции, изготовленной и испытанной в Краматорском НИИПТМАШ в период 2011-2012г.г., рис.5.7, включал два опорных привода ролика диаметрами 50 мм с приводом от асинхронного двигателя мощностью 2 кВт через систему шестерен. Расстояние между их осями составляло 800 мм. Два гибочных ролика диаметрами 40 мм располагали на рычаге при расстоянии между их осями 600 мм. Рычаг был оперт на подшипник качения. Для опытов эту установку располагали на прессе усилием 500 кН и в этом режиме производили измерения усилий и соответствующих им величин остаточной кривизны.

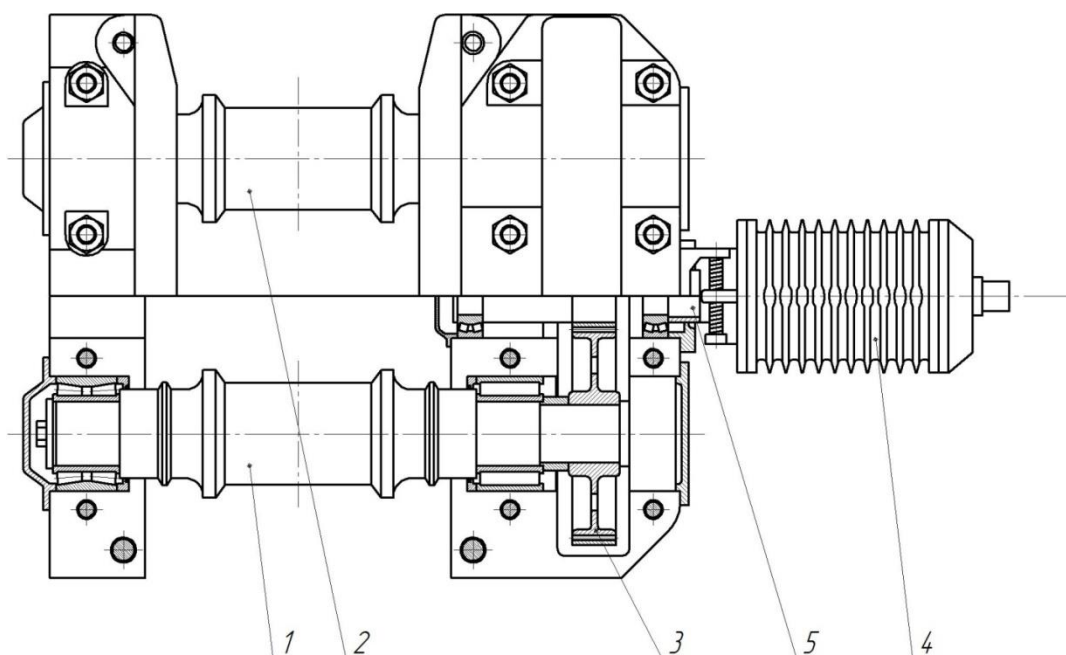


Рисунок 5.7 – Конструкция опорных роликов

При деформации изгиба двумя равными усилиями изгибающий момент изменяется только на участках длиной l_0 вблизи опор заготовки. Но на длине $(l - 2l_0)$ изгибающий момент является величиной постоянной. Здесь $M = 0,5Pl = const$, где l_0 - расстояние от опор заготовки, где приложены усилия деформации. Кривизна деформируемой заготовки,

которую она приобретает в процессе изгиба, определяется именно величиной изгибающего момента.

Применение схемы по рисунку 5.3 приводит к деформации с переменным моментом изгиба и с переменной величиной кривизны, что определяет низкую точность размеров деформированной заготовки. Деформация по схеме рисунка 5.3б обладает тем преимуществом, что на длине, равной $(l - 2l_0)$ изгибающий момент и кривизна деформируемой заготовки будут постоянными.

Выше было показано, что для схемы по рисунку 5.3а пластическую деформацию нельзя обеспечить на концевых участках заготовки, длина которых не может быть меньше, чем $\frac{l}{3}$. Следовательно, при такой модели деформируемого материала пластическая зона не может иметь длину, превышающую $\frac{1}{3}l$, а участки длиной по $\frac{1}{3}l$ вблизи опор испытывают только упругие деформации и после разгрузки останутся прямыми. Реализация схемы по рисунку 5.3б приведет к тому, что длина таких участков составит только $2l_0$ и при $l_0=0,15l$ пластическая деформация, (при постоянной кривизне), будет обеспечена на длине 70% общей длины заготовки, а при $l_0=0,10l$ - на длине 80% от полной длины. Если реализуется изгиб заготовки в процессе ее движения, то условия деформации, конечно, более благоприятные для повышения точности величины кривизны деформируемой заготовки, поскольку каждый ее элемент, (за исключением концевых участков) подвергается одной и той же деформации.

Выводы по 5 главе.

1. По результатам диссертационной работы разработана машина новой конструкции с двумя гибочными роликами, установленными на траверсе, которая имеет возможность вращения относительно оси расположенной на жестком блоке. Испытан экспериментальный вариант данного устройства, позволяющего более чем в два раза повысить точность деформации изгиба.

2. Проработано несколько вариантов конструкции такой машины с гидравлическим и электрическим приводами.

3. Основная идея новой конструкции заключается в том, что деформацию изгиба заготовки осуществляют два гибочных ролика, расположенных на балке, опертой на шарнир с возможностью вращения этой балки относительно оси указанного шарнира, опертого на ползун, соединенный с приводом перемещения указанной балки, при этом расстояния от оси шарнира до осей обоих гибочных роликов равны.

4. При изгибе в машинах известных конструкций изгибающие моменты являются переменными по всей длине заготовок, следовательно, и их кривизна существенно изменяется. Предложенная конструкция обеспечивает изгиб в условиях действия постоянного изгибающего момента на длине до 0,7-0,8 общей длины деформируемой заготовки, что позволяет существенно повысить точность кривизны.

ГЛАВА 6. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

6.1. Усовершенствование методов расчета усилий при локальной деформации заготовок

Как уже было показано выше, см. главы 1,2, локальная деформация цилиндрических заготовок (труб) часто применяется для получения изделий значительной длины с утолщенными концевыми участками. Использование для этой цели горизонтально-ковочных машин не эффективно и не обеспечивает высокого качества заготовок. Как уже было отмечено, на ряде предприятий для этих целей используют молоты, (например, пневматические молоты типов МБ134, МБ412), но в этих случаях, часто приходится повторно нагревать концевые участки труб до трех-четырёх раз, что увеличивает время и стоимость технологического процесса и ухудшает качество трубных заготовок.

Поэтому были созданы специализированные ковочные машины конструкции НИИПТМАШ [22,142]. Эти машины имеют в 4-5 раз меньшую массу оборудования. Ковочные машины включают устройства индукционного нагрева со сменными индукторами, стол с приспособлениями для подачи и фиксации труб, стеллажи подачи и уборки труб, пульт управления.

Ряд вопросов, связанных с проектированием устройств высадки изложен в [73,74], а также в работах [135, 137].

Основные идеи, заложенные в основу проектирования этих машин, таковы:

а) реализация только локального нагрева концевых участков заготовок и непосредственно в рабочем положении перед началом деформации, (для уменьшения потерь тепловой энергии, т.е. реализована

идея – нагревать заготовку там, где осуществляется деформация, - в рабочем положении);

б) для повышения точности во всех случаях в полость трубы до начала деформации вводят центрирующий стержень;

в) также для повышения точности и предотвращения искажений конфигурации деформируемых заготовок, их концевые участки фиксируют сжатием в специальных матрицах с ограничением деформации.

Схема осуществления двух вариантов деформации в ковочных машинах, показана на рис. 6.1 и 6.2.

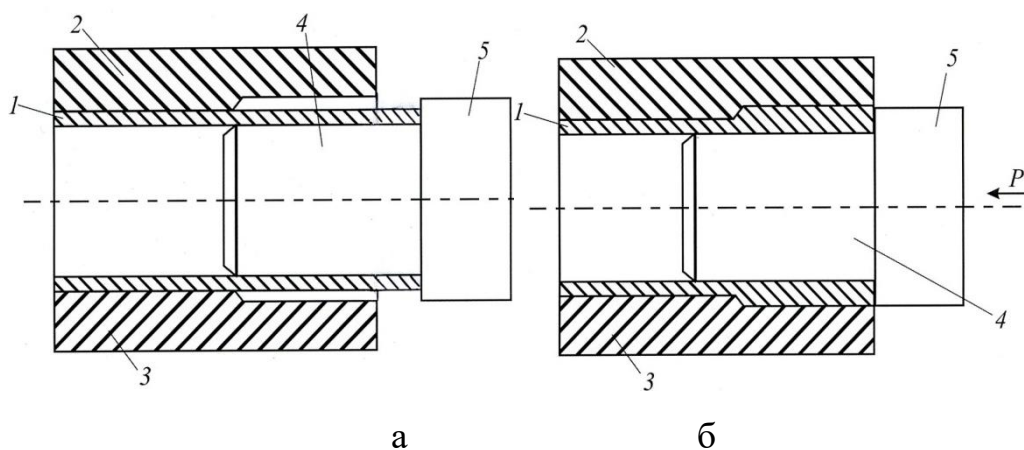


Рисунок 6.1 – Схема локальной деформации полых заготовок: а - исходное положение трубной заготовки; б – окончательное положение заготовки в ковочной машине

В первом варианте полуоую заготовку 1, рис.6.1а после нагрева индуктором ее концевого участка длиной 120-150 мм зажимают в матрицах 2 и 3 и вводят во внутреннюю полость заготовки центрирующий стержень 4, соединенный с пуансоном 5. На рис.6.1а показано положение заготовки до начала деформации, а на рис. 6.1б после завершения процесса деформации.

Перемещение пуансона 5 влево позволяет реализовать пластическую деформацию концевого участка трубы при начальной его температуре 1100-1130⁰С. Как видно из рис. 6.1б при этом формируется утолщенный участок заготовки, ограниченный по наружной поверхности

полуматрицами 2,3, а по внутренней – направляющим стержнем. Можно, выбирая различные величины зазоров, обеспечить и увеличение наружного диаметра заготовки 1 (за счет профилировки полуматриц 2,3), и ее течение к оси симметрии в процессе пластической деформации, (за счет выбора диаметра направляющего стержня 4).

Но можно выполнить направляющий стержень 4 уменьшенного диаметра при расположении заготовки 1 в матрицах 2,3 так, как показано на рис. 6.2, (т.е. без зазоров между половинами матриц и деформируемой заготовкой). Тогда деформация концевой участка возможна только при течении металла заготовки внутрь полости трубы 1, как показано на рис. 6.2. В этом случае на полой заготовке формируется участок увеличенной толщины за счет локального уменьшения ее внутреннего диаметра, а не увеличения наружного диаметра.

Таким образом, можно варьировать в широком диапазоне размеры заготовок и с увеличенным наружным диаметром, и с уменьшенным внутренним диаметром [135].

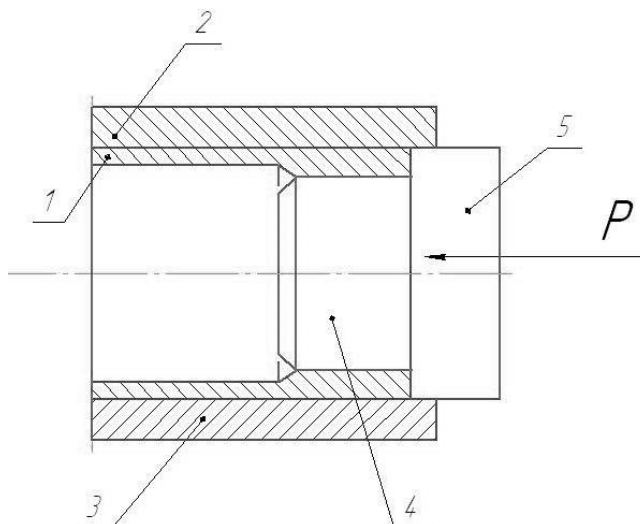


Рисунок 6.2- Схема локальной деформации полой заготовки с уменьшением ее внутреннего диаметра

Это обеспечит возможность изготовления полых заготовок широкого сортамента. Можно также выполнить резьбу на части длины стержня 4 и обеспечить формирование резьбы на внутренней поверхности деформируемой заготовки 1, (но в этом случае надо после завершения деформации удалять из заготовки стержень 4 с одновременным вращением).

Закономерности пластической деформации изложены в ряде работ, см. например, [129-133, 142], (где приведены и библиографические ссылки).

Можно изготавливать способом локальной деформации и фланцы на концах труб, как показано на рис. 6.3. Заготовку 1 зажимают матрицами 2,3 так, что ее конец выступает из матриц.

Труба 1 наружным диаметром d с толщиной стенки h после нагрева индуктором ее концевой участка длиной 70-80 мм зажимают в матрицах 2 и 3 (на длине 120-200 мм), так что конец заготовки свободно выступает на длину l . Далее пуансон 4 с внутренним направляющим стержнем 5 начинает при движении осуществлять пластическую деформацию концевой участка трубы, расплющивая его. При этом формируется фланец 6 диаметром d_0 и толщиной h_0 , который образует с трубой 1 единое изделие, что исключает операции сварки, напрессовки или иные способы соединения двух деталей.

Существенным в этом способе является использование направляющего стержня 5, без чего формирование качественных фланцев невозможно.

В данном случае условие постоянства объема можно записать в виде

$$\frac{\pi}{4} [d^2 - (d - 2h)^2] l = \frac{\pi}{4} [d_0^2 - (d - 2h)^2] h_0.$$

Поэтому диаметр фланца равен:

$$d_0 = d \sqrt{1 + \left(\frac{4h}{d} - \frac{4h^2}{d^2} \right) \left(\frac{l}{h_0} - 1 \right)}$$

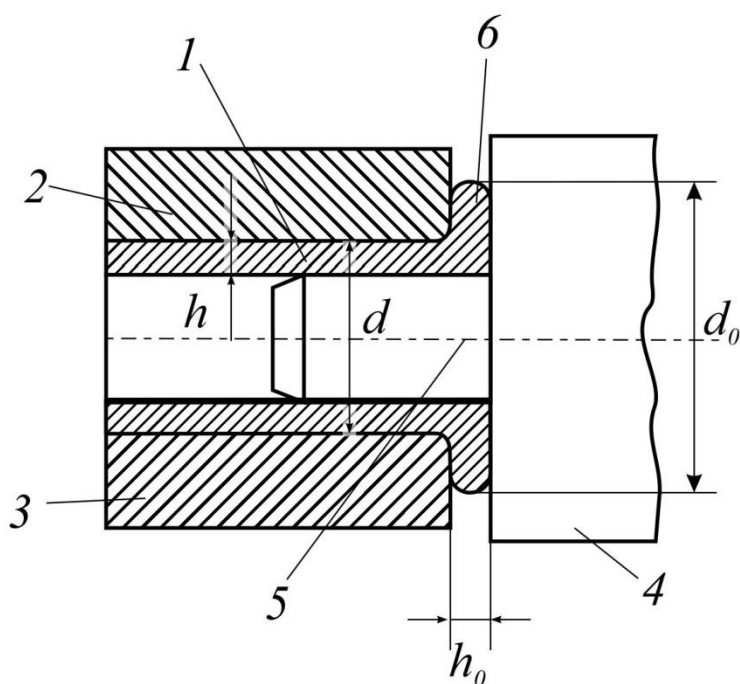


Рисунок 6.3 – Схема локальной деформации полой заготовки при расплющивании концевой участка трубы

Чем больше диаметр фланца d_0 , тем большей должна быть величина « l », (при $\frac{l}{h_0} = 1$; $d_0 = d$), рис. 6.3. Например, если $d=60$ мм, $l=24$ мм, $h=6$ мм, $h_0=h=6$ мм, получаем $d_0=1,44d=86$ мм.

При малых величинах $\frac{h}{d}$ ($\frac{h}{d} < 0,5$) можно упростить эту формулу и принять

$$\frac{d_0}{d} = \sqrt{1 + \frac{4h}{d} \left(\frac{l}{h_0} - 1 \right)} \quad (6.1)$$

Величина диаметра фланца « d_0 », получаемого данным способом, оказывается ограниченной. Это ограничение возникает ввиду возможности потери устойчивости участка трубы длиной l .

Вопросы определения критических усилий при потере устойчивости рассмотрены в работах [137,140, 149].

Согласно работам Р. Лоренца, С.П. Тимошенко [146] и других ученых потеря устойчивости при упругой деформации возможна при усилении

$$P_k = \frac{2\pi E h^2}{\sqrt{3(1-\gamma^2)}}, \quad (6.2)$$

где E – модуль упругости материала цилиндра; γ – коэффициент Пуассона, когда на образующей цилиндрической оболочки возникает число «волн», равное « n ».

Критическое усилие не зависит от длины « l » консольного участка трубы, что, однако, во многих случаях противоречит экспериментальным данным и является недостатком формулы (6.2).

В работе [137] указано, что такой вид потери устойчивости происходит только для весьма тонких оболочек. Фактически, часто при потере устойчивости консольного участка трубы возникает только один участок увеличенного диаметра, (соответственно формированию «половины волны»).

Пример деформированной алюминиевой трубы диаметром 90 мм и толщиной 5,5 мм приведен в работе [131].

При сжатии потеря устойчивости произошла только у края трубы на длине приблизительно равной четырем ее толщинам.

Для использования формулы (6.2) необходимо знать величину модуля упругости, причем для стальных заготовок – при температурах 1000-1300°C.

Данные по модулю упругости сталей при высоких температурах приведены в [138, 139]. В работе [139] для углеродистых и низколегированных сталей при температурах $t \geq 900^\circ\text{C}$ приведена формула

$$E(t) = E_0 \exp(-\gamma_0 t),$$

Однако для реальных толщин приведенные формулы дают результаты, существенно отличающиеся от экспериментальных данных.

В условиях развитых пластических деформаций были определены предельные величины отношений $\frac{l}{d}$ для образцов технического алюминия диаметрами 25 мм и 50 мм толщинами 1, 2, 4, 6 и 8 мм, а также образцов из стали 3 при 1050° – 1100° С, (диаметрами 40, 60, 80 мм толщинами от 2 мм до 20 мм). Результаты иллюстрируются рисунком 6.4, где диапазоны 1 и 2 на графиках функций $\frac{l}{d} \left(\frac{h}{d} \right)$ соответствуют различным условиям локальной деформации.

Диапазон 1 соответствует деформации сжатия концевой участка трубы с направляющим, внутренним стержнем, по схеме, соответствующей рис. 6.3 (на рис. 6.3 этот направляющий стержень обозначен позицией 5). Диапазон 2 на рис. 6.4 соответствует локальной деформации сжатия без указанного стержня. Видно, что в этом случае потеря устойчивости по схеме, иллюстрируемой рис. 6.3 происходит при гораздо меньших (примерно в 2,0-2,5 раза) величинах l .

Таким образом, использование указанных направляющих внутренних стержней дает существенный положительный эффект.

Это подтверждает, на наш взгляд, целесообразность применения данной конструкции для ковочных машин.

Если, например, нам желательно для трубы с толщиной стенки $h = 5$ мм получить фланец такой же толщины, то согласно формуле (6.1) определим параметр $\left(\frac{d_0}{d} \right) = 1,44$.

Поэтому $d_0 = 1,44 \cdot d = 1,44 \cdot 60 = 86,4$ мм, следовательно, на трубе диаметром 60 мм толщиной стенки $h = 5$ мм можно изготовить фланцевый участок диаметром фланца до 86 мм. Такие фланцы предпочтительнее, чем диски, прикрепленные к трубе сваркой (ввиду наличия остаточных напряжений и коробления после сварки).

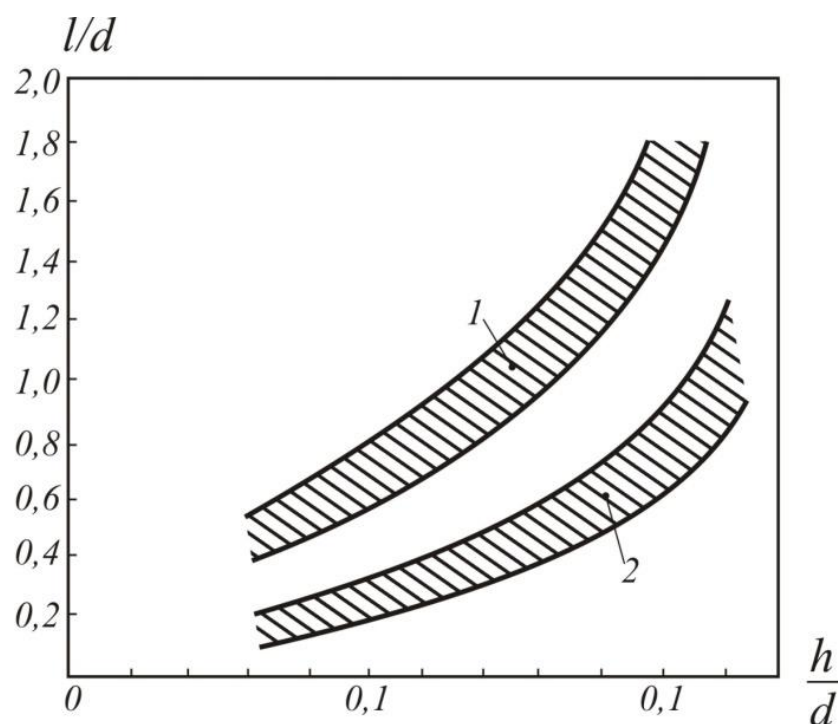


Рисунок 6.4 – Графики функции $\frac{l}{d} \left(\frac{h}{d} \right)$ при деформации полых заготовок (1,2 – см. в тексте)

Для материалов высокой пластичности можно изготовить фланец в виде складки, как показано на рис. 6.5, (получено для алюминиевой трубы толщиной 6 мм) [142].



Рисунок 6.5 – Конфигурация фланцев в виде складки при деформации после потери устойчивости

Для определения усилий используем метод верхних оценок, связанный с построением кинематически допустимых полей скоростей, см. работы [116-123].

При деформации по схеме рис. 6.1, если принять кинематически допустимое поле скоростей

$$V_r = \frac{V_0}{2l} r, \quad V_z = -\frac{V_0}{l} z, \quad (6.3)$$

где V_0 – скорость пуансона, то компоненты тензора скорости деформации

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

(компоненты, соответствующие деформации сдвига, равны нулю).

Интенсивность тензора скорости деформации

$$H = \sqrt{3} \frac{V_0}{l}.$$

Мощность формоизменения равна:

$$N_1 = \frac{k\pi\sqrt{3}v_0}{4} (d_0^2 - d_1^2). \quad (6.4)$$

или $N_1 = \frac{\sigma_T \pi v_0}{4} (d_0^2 - d_1^2).$

Следует учесть также мощность среза

$$N_2 = \int_{0,5d_1}^{0,5d_0} kV_r 2\pi r dr = 2\pi k \int_{0,5d_1}^{0,5d_0} \frac{V_0}{2l} r^2 dr;$$

$$N_2 = \frac{\pi k v_0}{24} (d_0^3 - d_1^3)$$

Мощность трения N_3 определяем при допущении, что сила трения равна « k ».

Поэтому баланс мощности можно записать в виде

$$N = PV_0 = pV_0 \frac{\pi}{4} (d_0^3 - d_1^3) = N_1 + N_2 + N_3 \quad \text{или}$$

$$\frac{p\pi v_0}{4} (d_0^2 - d_1^2) = \frac{\sqrt{3}\pi k v_0}{4} (d_0^2 - d_1^2) + \frac{\pi k v_0 (d_0^3 - d_1^3)}{12l};$$

а среднее давление равно:

$$p = k\sqrt{3} + \frac{k}{3} \frac{d_0^2 + d_0 d_1 + d_1^2}{l(d_0 + d_1)} \quad (6.5)$$

Можно записать эту формулу в виде:

$$\frac{p}{\sigma_T} = 1 + \frac{(A^2 + A + 1) d_1}{3\sqrt{3}(A + 1) l}, \quad (6.6)$$

где A – соотношение $\frac{d_0}{d_1} = A$.

Если, например, реализуем осадку трубы наружным диаметром $d = 60$ и внутренним $d_1 = 50$ мм с увеличением наружного диаметра до 70 мм на длине 0,1 м, то по формуле (6.6) получим при $A = 1,4$

$$\frac{p}{\sigma_T} = 1 + \frac{4,36}{3\sqrt{3} \cdot 2,4} \frac{0,05}{0,10} = 1,175$$

и если в данном случае $\sigma_T = 110 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, то удельное давление

$$p = 1,175 \cdot 110 = 129,3 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}, \text{ а усилие деформации}$$

$$P = 129,3 \frac{\pi}{4} (4900 - 2500) \cdot 10^{-6} = 0,244 \text{ МН.}$$

Теперь рассмотрим деформацию участка заготовки вблизи фланца (т.е. не по схеме рис. 6.1 или 6.2, а по схеме 6.3)

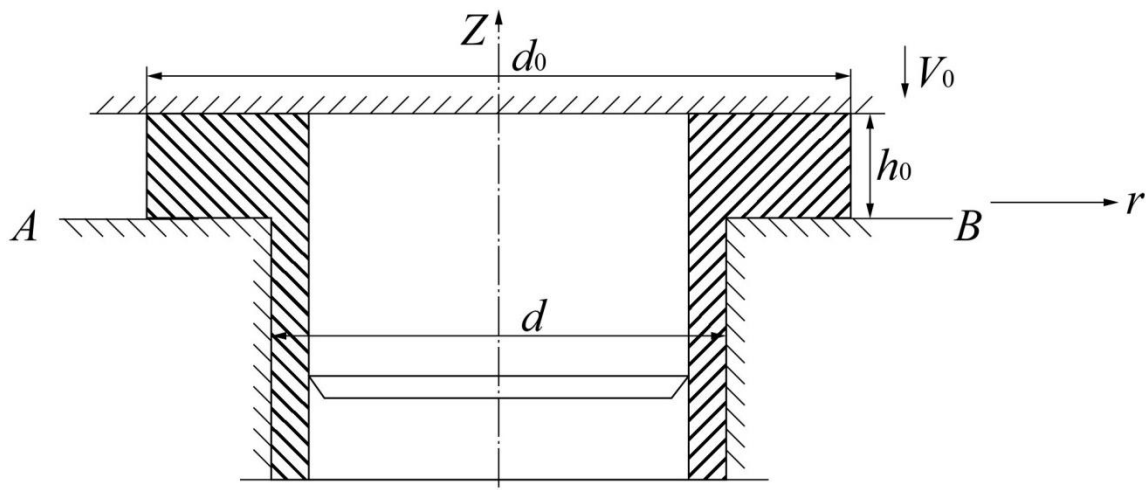


Рисунок 6.6 – Вариант схемы деформации фланца

Приняв осесимметричную схему деформации и начало координат в плоскости АВ, можно принять поле скоростей

$$V_r = \frac{V_0}{2h_0}r, V_z = -\frac{V_0}{2h_0}z \quad (6.7)$$

где размер h_0 показан на рис. 6.6. В этом случае $V_z = 0$ в плоскости $z = 0$ (и в зоне $z < 0$). Тогда получим $\varepsilon_r = \frac{V_0}{2h_0}$, $\varepsilon_\theta = \frac{V_0}{2h_0}$, $\varepsilon_z = -\frac{V_0}{2h_0}$ и условие несжимаемости $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = -\varepsilon_z$ - выполнено.

При $z < 0$; $V_r = V_z = 0$ и материал является жестким. Мощность формоизменения (согласно формулам, приведенным выше, (6.5), (6.6))

$$N_1 = \frac{k\sqrt{3}}{4}\pi V_0 [d_0^2 - (d - 2h)^2],$$

а если $h \ll d$, то $N_1 = \frac{k\sqrt{3}}{4}\pi V_0 (d_0^2 - d^2)$.

Кроме того, надо учесть мощность трения в плоскостях $Z = 0$ и $Z = h_0$, причем примем максимально возможные силы трения, равные $\tau_r = k$. В этом случае мощности сил трения N_2 (при $Z = 0$) и N_3 (при $Z = h_0$) равны

$$N_2 = N_3 = \int_{0,5d-h}^{0,5d_0} 2\pi\tau_n \left(\frac{V_0 r}{2h_0}\right) \cdot r dr = \frac{\pi k V_0}{h_0} \left(\frac{r^3}{3}\right) \Big|_{0,5d-h}^{0,5d_0},$$

$$N_2 = N_3 = \frac{\pi k V_0}{24} (d_0^3 - d^3)$$

Полная мощность равна

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = P N_0 = \frac{p V_0}{4} (d_0^2 - d^2)$$

и отсюда определяем среднее удельное давление:

$$\frac{p}{\sigma_T} = 1 + \frac{d_0}{3h_0\sqrt{3}} \frac{\left(1 + \frac{d}{d_0} + \frac{d^2}{d_0^2}\right)}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (6.8)$$

Например, если $d_0 = 100\text{мм}$, $d = 80\text{мм}$, $h_0 = 10\text{мм}$, то по формуле (6.8) получим

$$\frac{p}{\sigma_T} = 1 + \frac{100}{3 \cdot 10 \sqrt{3}} \frac{2,8+0,64}{1,8} = 4,67$$

В работе [132] получена более точная формула в виде

$$\frac{\rho}{\sigma_T} = 1 + \frac{1}{A^2-1} \left[\frac{4h_0}{d} - \frac{4h_0^2}{d^2} + \frac{d}{3\sqrt{3}h_0} \left(A^3 - 1 + 6\frac{h_0}{d} - 12\frac{h_0^2}{d^2} + 8\frac{h_0^3}{d^3} \right) \right], (6.9)$$

где $A = \frac{d_0}{d}$.

Для приведенного примера $A = \frac{100}{80} = 1,25$; $\frac{h_0}{d} = 0,125$ получим

$$\frac{p}{\sigma_T} = 1 + \frac{1}{0,5625} [4 \cdot 0,125 - 4 \cdot 0,015625 + 1,54(1,953 - 1 + 0,75 - 0,1875 + 0,0156)] \approx 6,0$$

Можно построить второй вариант кинематически допустимого поля скоростей, в котором предусмотрено наличие жесткой зоны, примыкающей к контактной поверхности. Схема этого поля иллюстрируется рис. 6.7.

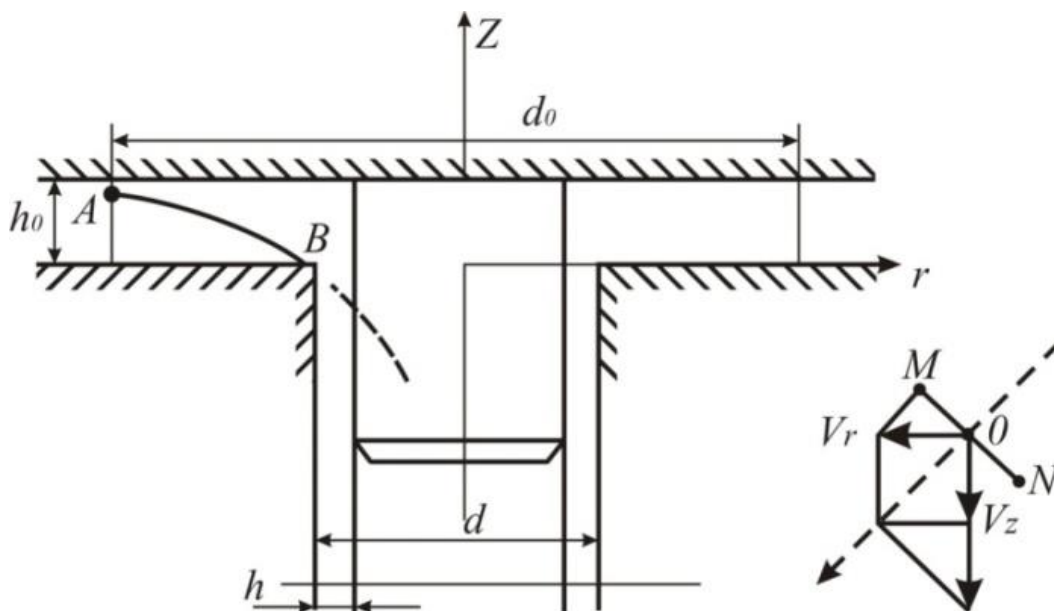


Рисунок 6.7 – Схема построения кинематически допустимого поля скоростей

Предположим, что существует такая поверхность вращения АВ (она образована вращением линии АВ вокруг оси Z). Если существует такая поверхность, то в любой точке О (рис. 6.7) проекции скоростей обеих зон на нормали к поверхности (и ее образующей) «n» должны быть для обеих зон равны. Поверхность АВ разделяет две поверхности: часть металла, расположенная ниже этой поверхности деформируется при поле скоростей (6.6), а металл, расположенный 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, рис. 6.7, то проекции скоростей V_r и V_z нижней зоны, и скорости $V_z = -V_0$ на нормаль должны быть равны. Как показано в [135], такая поверхность существует: это параболоид с уравнением

$$Z(r) = h_0 \left(1 - \frac{d^2}{4r^2}\right) \quad (6.10)$$

(при $r = \frac{d}{2}, Z(r) = 0$).

Мощность формоизменения N_1 равна

$$N_1 = 0,25\pi k \sqrt{3} V_0 d^2 (A^2 - 1 - 2 \ln A), \text{ а мощность сил трения}$$

$$N_2 = \frac{\pi k V_0 d^3}{24 h_0} (A^3 - 1) \text{ см. [135].}$$

Конечно, следует учесть и мощность среза вдоль поверхности вращения АВ: N_3

$$N_3 = \int_{0,5d}^{0,5d_0} 2\pi k r \Delta V \sqrt{1 + \left(\frac{dz_0}{dr}\right)^2} dr = \frac{\pi k V_0 d^3}{24 h_0} (A^3 - 1) \left(1 + \frac{4h_0^2}{d^2 A^2}\right) \text{ см. [135].}$$

Приравняв эти величины: $N_1+N_2+N_3$ величине $PV_0 = p \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d^2)$

получим

$$\frac{p}{\sigma_T} = 1 - \frac{2 \ln A}{A^2 - 1} + \frac{A^2 + A + 1}{3\sqrt{3}(A+1)} \frac{d}{h_0} \quad (6.11)$$

Например, при $\frac{d_0}{h_0} = 12$, $A=1,4$ величина $\frac{p}{\sigma_T} = 4,5$, что в 1,5 раза меньше, чем эта же величина для поля скоростей, не содержащего жесткой зоны.

Для примера, приведенного выше, если $\frac{d_0}{h_0} = 8$, $A=1,25$ получим:

$$\frac{p}{\sigma_T} = 1 - \frac{2 \ln 1,25}{0,5625} + \frac{3,8 \cdot 1,25}{3\sqrt{3} \cdot 2,25} \cdot 8 = 2,8.$$

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

При локальной деформации по схеме рис. 6.1, обозначив наружный диаметр d , внутренний d_1 , а увеличенный (после деформации) d_0 можно оценить степень деформации $\varepsilon = \ln \frac{l_0}{l}$, где l_0 - начальная длина участка, толщину которого мы увеличиваем.

При схемах деформации по рис. 6.1 и 6.2 можно следуя [135], определять среднее давление по формуле (6.6), а сопротивление деформации

$$\sigma_T = \sigma_0 \varepsilon^{n_1} (\dot{\varepsilon})^{n_2} \exp(-n_3 t), \quad (6.12)$$

где σ_0, n_1, n_2, n_3 - величины для данного металла или сплава постоянные.

Например, для случая деформации стальной трубы из стали 36Г2С толщиной 5 мм и диаметром $d = 60$ мм, $d_1 = 50$ мм надо для увеличения диаметра до величины $d_0 = 70$ мм обеспечить степень деформации

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{4900 - 2500}{3600 - 2500}\right) = \ln(2,18) = 0,78.$$

Если время деформации 0,8с, то скорость деформации $\dot{\varepsilon} \approx 1$ и при температуре 910⁰С и $\sigma_0 = 1600 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2} \text{с}^{n_2}$, $n_1 = 0,25$; $n_2 = 0,14$; $n_3 = 3 \cdot 10^{-3}$ величина σ_T будет равной (согласно 6.12) (при $t = 920^0\text{C}$)

$$\sigma_T = 1600 \cdot 0,78^{0,25} \cdot 1 \cdot \exp(-2,70) = 102 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}.$$

По формуле (6.6) при $A = \frac{70}{50} = 1,4$; $d_1 = 50$ мм; $l = 100$ мм получим

$\frac{p}{\sigma_T} = 1,15$ и, следовательно, давление $p = 117 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, а усилие

$$P = \frac{\pi}{4} (70^2 - 50^2) \cdot 10^{-6} p = 1,884 \cdot 10^{-3} \cdot 117 = 0,22 \text{ МН}.$$

Следует иметь в виду, что как показали опытные данные, получить качественные заготовки по схеме рис. 6.3 возможно только при использовании центрирующего стержня вводимого до начала процесса деформации в полость заготовки.

6.2. Экспериментальное исследование процесса локальной деформации

Исследования были проведены на специальных образцах длинами 400 мм. После нагрева их концевых участков длинами $\sim 150 - 170$ мм их устанавливали в специальном приспособлении (в вертикальном положении) в станине прессы усилием 2МН и движением траверсы вводили в нагретый участок трубы направляющий стержень, одновременно осуществляли сжатие матрицами концевого участка на длине 120 мм [135]. После этого сразу осуществляли деформацию движением пуансона. Измерение усилий осуществляли мессдозой с проволочными тензодатчиками, расположенной над пуансоном. Предварительно мессдозы тарировали на прессе.

На рис. 6.8 показана схема экспериментальной установки. Образец трубы 1 устанавливали на плите пресса 2 совместно с основанием 3, на котором расположены полуматрицы 4, сжатие которых перед осадкой трубы, осуществляли пневматическими цилиндрами.

Направляющий стержень 5, прикрепленный к пуансону 6, вводили в заготовку 1 непосредственно перед началом деформации. Усилие деформации P передавалось через мессдозу 7 с проволочными тензодатчиками. На рис. 6.8 показано положение пуансона перед началом деформации.

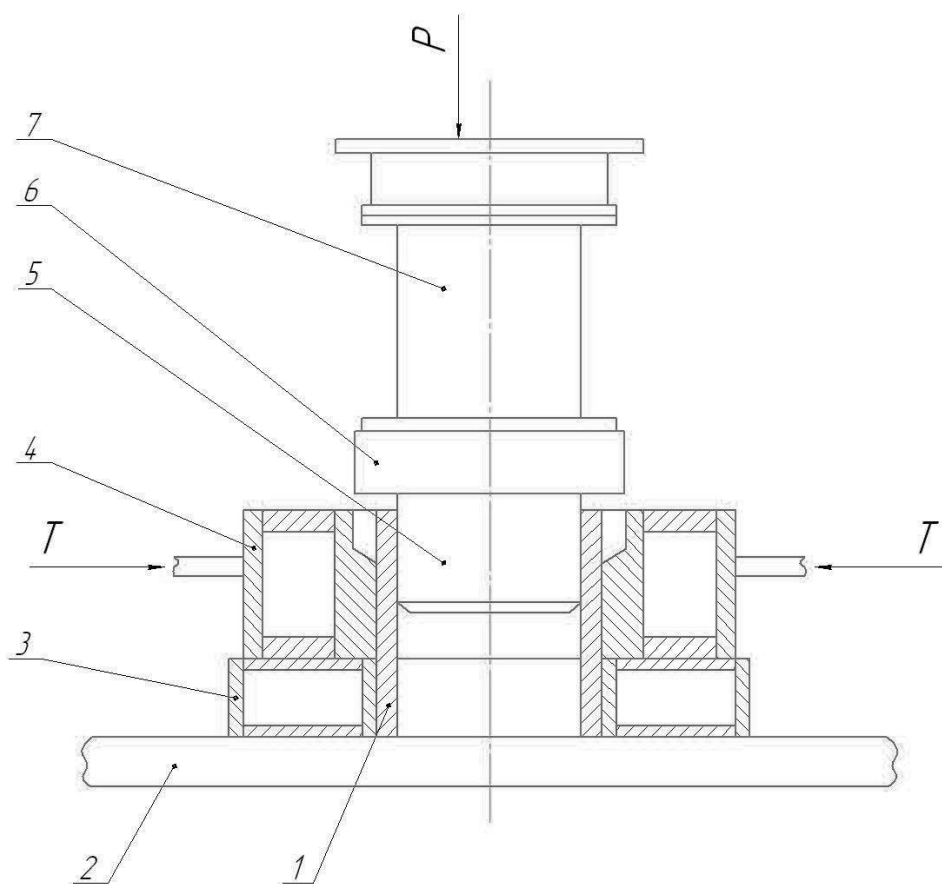


Рис. 6.8 – Схема экспериментальной установки для исследования процесса локальной деформации труб

Примеры осциллограмм изменения усилий при локальной деформации заготовок диаметрами 60 мм (по схеме рис. 6.1) из стали

36Г2С при $t = 900-930^{\circ}\text{C}$ (конечная температура), а размеры равны $d_0 = 70\text{мм}, d = 60\text{мм}, d_1 = 50\text{мм}$ приведены на рис. 6.9.

Опыты проводили далее и при схеме рис. 6.2, а также и с высадкой фланцев по схеме рис. 6.3.

Пример изменения усилий деформации при формировании утолщенного концевой участка ($d_0 = 70\text{мм}, d = 60\text{мм}, d_1 = 50\text{мм}$) приведен, как уже указано на рис. 6.9.

В этом случае, согласно расчетам, приведенным выше, если предел текучести $\sigma_T = 100 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, то усилие должно быть по расчетным данным равным $0,22 - 0,25 \text{ МН}$.

Но согласно опытным данным, оно может превышать эти величины в $1,2 - 1,35$ раз и достигать $0,33 - 0,35 \text{ МН}$.

Диапазон разброса экспериментальных данных весьма значительный. Для этого случая на рис. 6.10 приведены данные по давлениям в функции параметра $\frac{d_1}{l}$.

Видно, что зависимость, полученная на основании экспериментальных данных, близка к линейной (от параметра $\frac{d_1}{l}$), но разброс данных весьма значителен и следует указать на то, что экспериментальные данные могут в $1,35 - 1,40$ превышать расчетные, что видимо, свидетельствует о существенных колебаниях температуры.

В таблице 6.1 приведены данные по 46 измерениям величины усилия при локальной деформации заготовок из стали 36Г2С. Температура при локальной деформации труб диаметрами 64 мм изменялась в диапазоне $910-990^{\circ}\text{C}$.

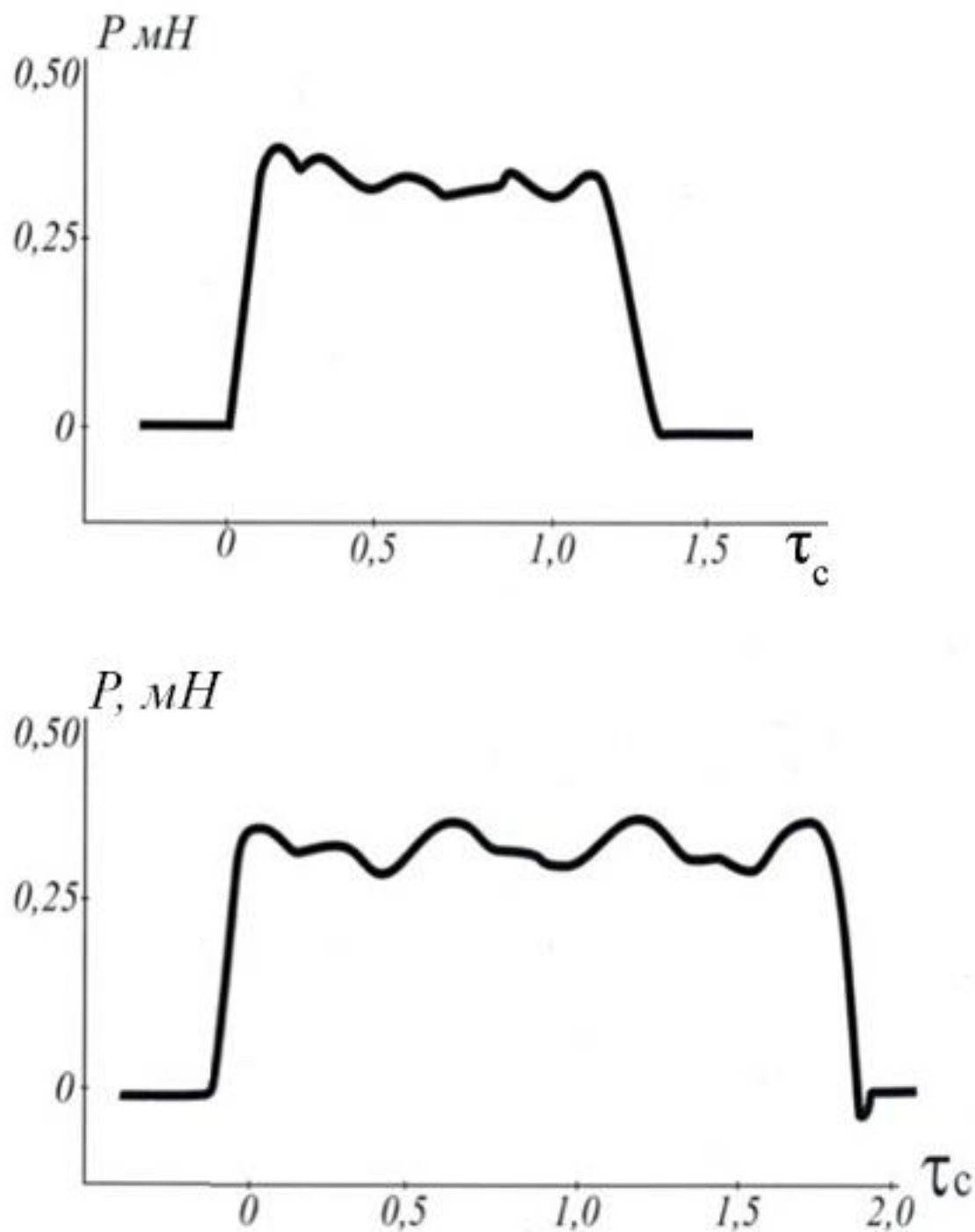


Рис. 6.9 – Графики изменения усилий при локальной деформации труб из стали 36Г2С диаметрами 50мм

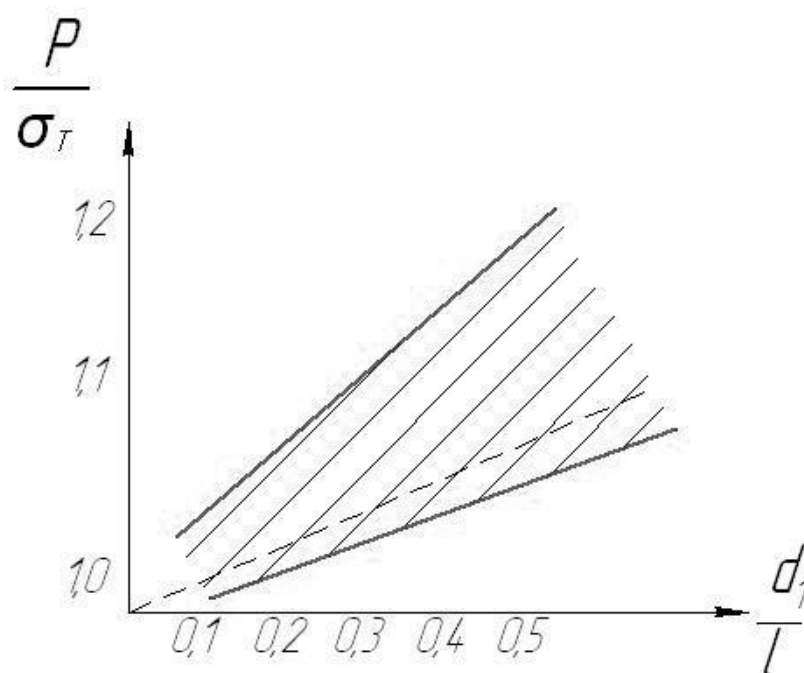


Рис. 6.10 – Диапазон изменения параметра $\frac{p}{\sigma_T}$ при изменении усилий в процессе высадки утолщенного участка трубы на длине 90-100мм, (при диаметрах $d = 60$ мм, $d_1=50$ мм) из стали 36Г2С

Все данные, (приведенные, в частности в таблице 1 Приложения 1) подвергали статистической обработке, для чего определяли математическое ожидание

$$P_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i,$$

где n - число опытов, а также дисперсию и среднее квадратичное отклонение.

$$D_P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2;$$

$$\sigma_P = \sqrt{D_P}.$$

Для серии опытов, представленных в таблице Приложения 1, эти величины были равны $P_m=0,60$ МН, а дисперсия этой величины $D_P=4,2 \cdot 10^{-3}$ (МН)².

В этом случае среднее квадратичное отклонение составило $\sigma_p = 6,5 \cdot 10^{-2}$ МН.

Если принять, как обычно, правило «трех сигм» $P = P_m \pm 3\sigma_p$, то с высокой степенью вероятности, (равной 0,997) можно утверждать, что в данных условиях усилие деформации изменяется в диапазоне $P = 0,60 \pm 0,195$ МН.

На наш взгляд столь широкий диапазон изменения усилий нельзя объяснять только «погрешностями измерений». Это объективная характеристика исследуемого процесса деформации. Поскольку толщина деформируемой заготовки мала (5мм), то ее охлаждение происходит очень быстро и даже небольшие колебания времени могут привести к существенным изменениям температуры и, следовательно, сопротивления деформации. Это приводит к изменениям усилий (в данном случае от 0,40 до 0,80 МН). Это следует учитывать при выборе технологии и оборудования для ее реализации.

На рис. 6.11 показаны примеры осциллограмм при изменении усилий в случае деформации с высадкой фланца по схеме рис. 6.3.

Характерным является возрастание усилий от 0,40-0,45 МН до 0,65÷0,80 МН.

Диаметры фланцевых участков соответствовали диапазону 70-74 мм.

Для этих данных, (для образцов из стали 45), величина математического ожидания составила $P_m = 0,94$ МН, что намного превышает усилие, соответствующее деформации трубы с утолщенным концевым участком. Дисперсия для этого случая равна $\sim 2 \cdot 10^{-3}(\text{МН})^2$, а средняя квадратичная ошибка $4,4 \cdot 10^{-2}(\text{МН})^2$.

Пример данных, полученных при высадке фланцевого участка для труб диаметрами 60мм толщиной 5 мм по данным 46 измерений приведен в таблице 1 Приложения 2. Для этих данных, (для образцов из стали 45), величина математического ожидания составила $P_m = 0,94$ МН, что намного

превышает усилие, соответствующее деформации трубы с утолщенным концевым участком. Дисперсия для этого случая равна $\sim 2 \cdot 10^{-3}(\text{МН})^2$, а средняя квадратичная ошибка $4,4 \cdot 10^{-2}(\text{МН})^2$.

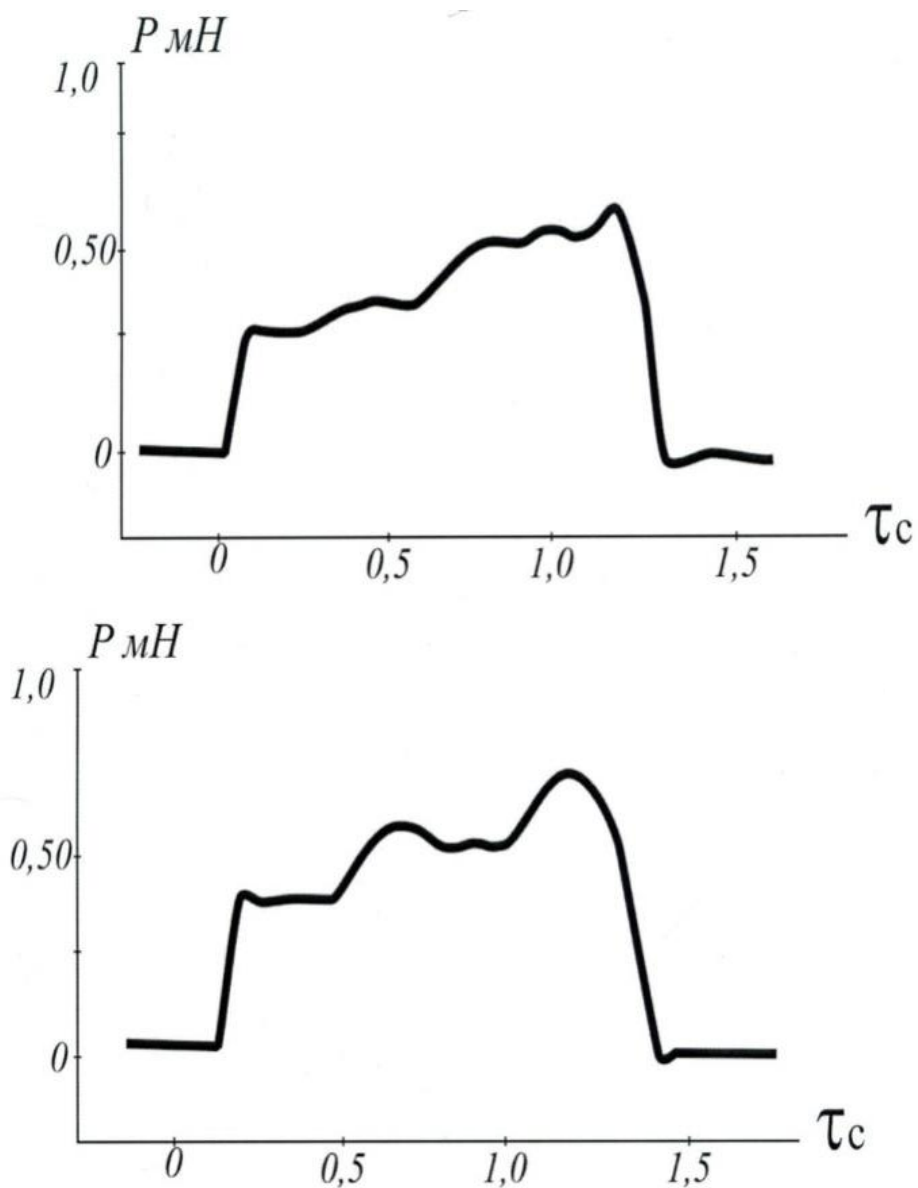


Рис. 6.11 – Графики $P(\tau)$ при деформации трубы по схеме рис. 6.3 при 1050°C для труб диаметрами 64 мм

По данным таблицы 1 Приложения 2 определим дисперсию и средне-квадратичное отклонение: $P_m \pm 3\sigma_k = 0,94 \pm 0,132$; $P_m = 0,81 \div 1,07$ МН; (если исключить результаты под № 32 в таблице Приложения 2), то $D_p = 14,5 \cdot 10^{-4}(\text{МН})^2$, $\sigma_p = 3,8 \cdot 10^{-2}$ МН.

На основании проведенных экспериментальных исследований было показано, что для полых стальных заготовок диаметрами до 50-65 мм и толщинами до 5 мм из углеродистых сталей и сталей типа 36Г2С с формированием участков увеличенной до 10-12 мм толщины, необходимо предусматривать ковочные машины усилиями до 0,85-0,90 МН.

В случае реализации деформации с формированием из заготовок тех же размеров фланцевых участков диаметрами до 90 мм и толщинами до 4-6 мм следует при проектировании оборудования учитывать, (при температурах не ниже 920°C), возможность воздействия усилий в диапазоне $0,85 \div 1,15$ МН.

Для изготовления полых заготовок такой же толщины, но диаметрами до 100 мм (из аналогичных сталей) по схеме рис. 6.1 необходимо применение ковочных машин усилиями до $1,8 \div 1,9$ МН.

Также было проведено исследование точности полученных изделий и величины разброса их размеров. Разброс величин наружных диаметров соответствовал диапазону $\pm 0,2$ мм. В монографии [121] отмечено, что для поковок типа ступенчатых валов и осей величины допуска 1,5% (см.[121]стр.16). На диаметре 60 мм это составляет 0,9 мм, (это подтверждается и опытом работы австрийских ковочных машин РКМ65). Это намного больше, чем в ковочной машине НИИПТМАШ. Даже в прецизионных радиально-ковочных машинах модели SFR 365 (Италия) при специальных режимах деформации с особо точным контролем температуры достигается точностьковки $\pm 0,3$ мм, [119] и видно, что ковочная машина НИИПТМАШ обеспечивает удовлетворительную точность деталей.

6.3. Разработка новой конструкции машины для локальной деформации криволинейных заготовок

Как уже отмечалось выше, ковочные машины, спроектированные и изготовленные НИИПТМАШ, были использованы, (впервые на предприятии «Укруглегеология» в Донецке) и позволили получить значительное количество труб из сталей 36Г2С, 60С2 и других для шахтного строительства. Эти машины предназначены для обработки труб с прямолинейными осями.

Однако, в ряде случаев возникает необходимость в получении труб с криволинейными осями и утолщенными концевыми участками, либо с фланцами в форме дисков. Затруднения возникают из-за отсутствия ковочных машин, предназначенных именно для изготовления таких изделий.

На рис. 6.12 показан пример соединения криволинейной трубы 1 с утолщенным концевым участком 2 при использовании переходной детали (втулки) 3. Утолщенный концевой участок 4 выполнен на трубе 5 с прямолинейной осью. В этом соединении можно использовать сварку или соединительные муфты. Можно использовать вариант, показанный на рисунке 6.13. В этом случае при соединении криволинейной трубы 1, рис. 6.13, (с осью в форме дуги окружности) используют втулку 3. После изготовления труб их концевые участки (по внутренней поверхности) подвергают механической обработке.

При этом на утолщенном участке трубы 1 проводят механическую обработку, формируя на ней прямолинейный участок. Затем на нем (и на концевом участке трубы 2) нарезают резьбу и ввинчивают в трубу 1 втулку 3. После этого соединяют с ней трубу 2.

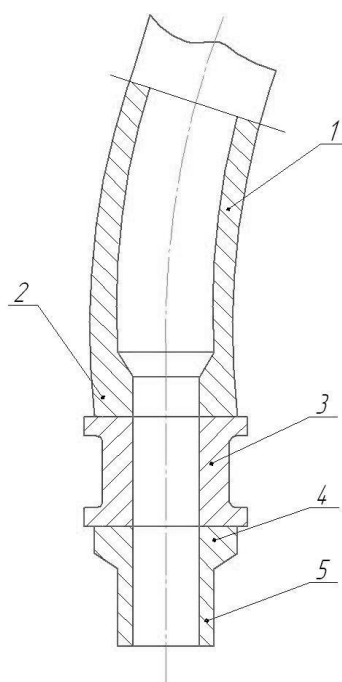


Рисунок 6.12 – Схема соединения криволинейной и прямолинейной трубы

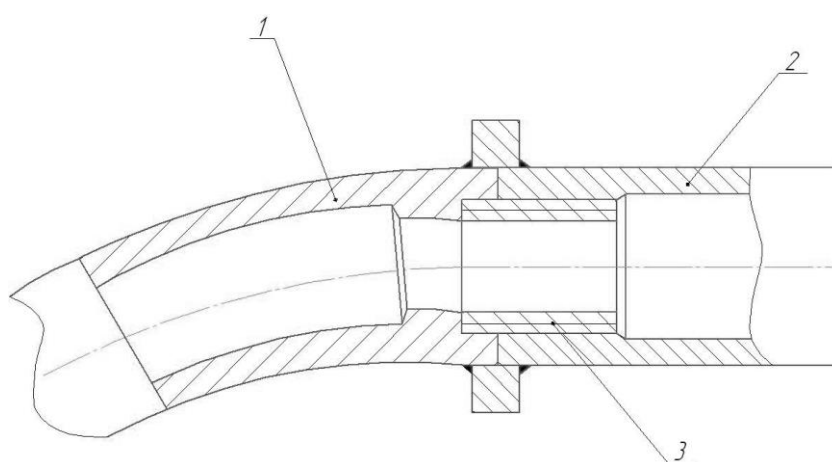


Рисунок 6.13 - Схема соединения криволинейной и прямолинейной труб с промежуточной втулкой

Существует много вариантов таких соединений. Разумеется, можно изготовить их на известных горизонтально ковочных машинах.

Однако для этого необходимо производство специальной оснастки для труб различных диаметров (для их крепления в машине и для реализации пластической деформации участка трубы). Часто возникает необходимость изготовить небольшую партию труб до 5-10 штук

заданного радиуса и толщины, а изготовление специальной оснастки и узла пуансона для столь малой партии экономически не эффективно.

С целью решения этой задачи была разработана новая конструкция ковочной машины [142], которая иллюстрируется рисунком 6.14.

Здесь показано положение пуансона перед началом деформации после подвода пуансона к нагретой заготовке. Положение пуансона после завершения процесса деформации показано на рисунке 6.15

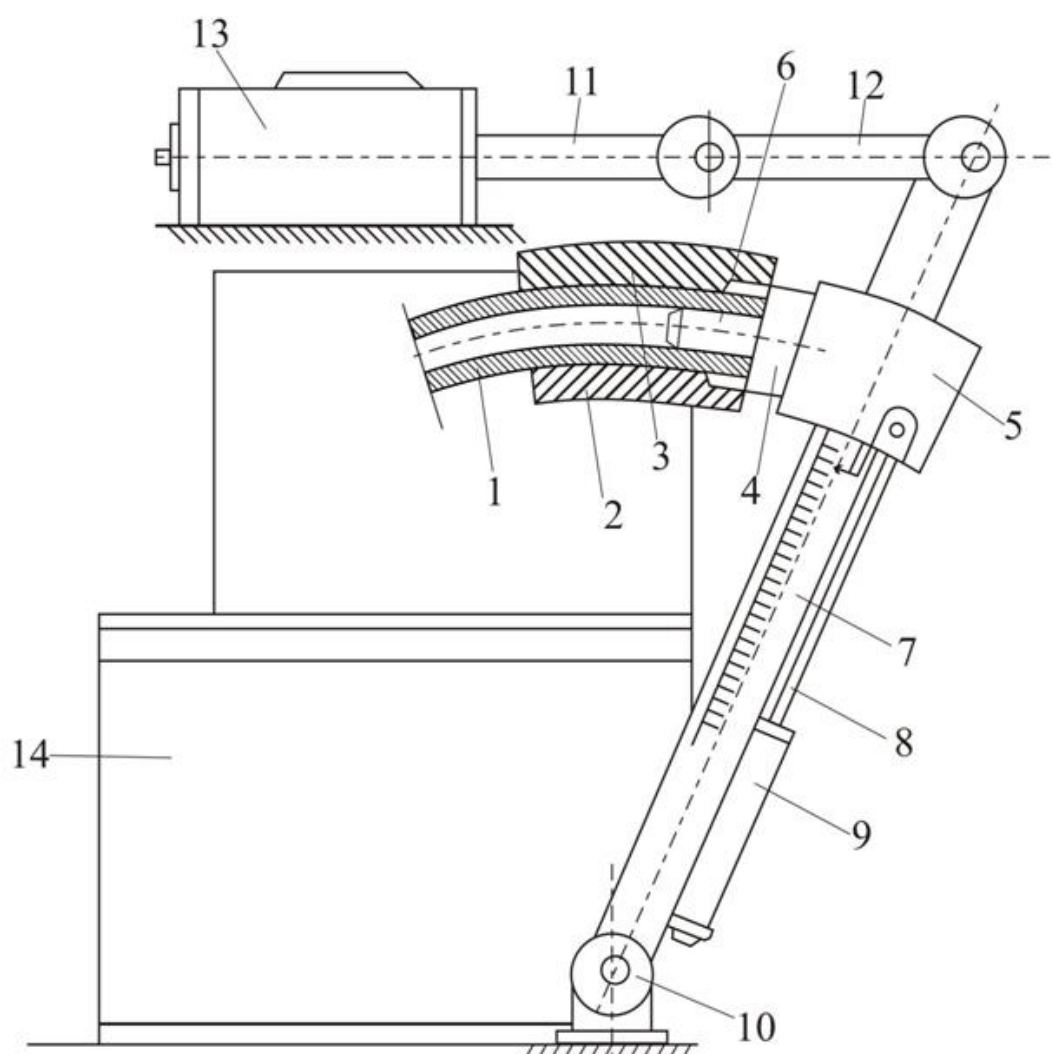


Рисунок 6.14 – Конструкция новой ковочной машины (положение пуансона до начала деформации)

На рисунке 6.14 и 6.15 приняты такие обозначения: криволинейная труба 1, концевой участок которой нагревают индуктором до $1080 - 1120^{\circ}\text{C}$ на длине 350-450 мм, труба находится в контакте с полуматрицами 2 и 3. Деформацию сжатия обеспечивает пуансон 4 за счет давления на торцевую поверхности трубы 1.

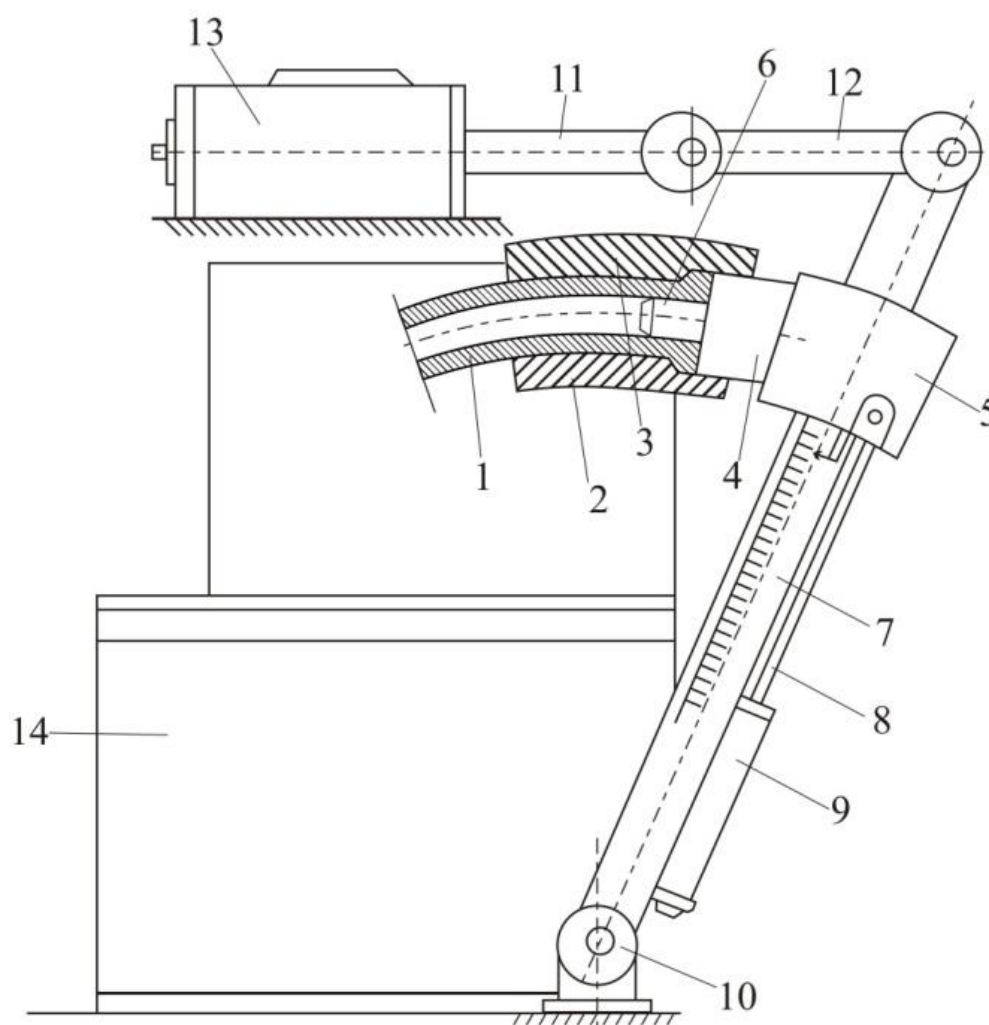


Рисунок 6.15 – Положение пуансона после завершения деформации

Пуансон 4 установлен на ползуне 5 и снабжен центрирующим стержнем 6. Ползун установлен на консольном рычаге 7 с возможностью перемещения вдоль указанного рычага с помощью тяги 8 при воздействии

пневматического цилиндра 9 (можно для перемещения ползуна 5 по рычагу 7 использовать также гидравлический цилиндр или механический привод).

Консольный рычаг 7 имеет возможность поворота вокруг оси 10 посредством привода поворота вокруг этой оси, например, при воздействии через рычаги 11, 12 усилия от гидравлического цилиндра 13. Все оборудование установлено на станине 14. Машина обеспечивает возможность формировать утолщенные участки у концов трубы, либо фланцы. Механизм зажима трубы, воздействующий на матрицы 2,3, включает клин, взаимодействующий с ползуном и дополнительный клин с фиксатором (эта часть устройства на чертеже не показана).

Методы определения верхней оценки величины усилия изложены выше, [137,138,140], а также [147,148-155].

Если, например, $d_m = 70$ мм, $d_1 = 62$ мм, $n_\sigma = 1,5$, $\sigma_T = 240 \frac{МН}{м^2}$ (для углеродистой стали при 1050°C), то $P = 0,25 \cdot 3,14 (0,07^2 - 0,062^2) \cdot 240 \cdot 1,5 = 0,3МН$.

На этой машине допустима деформация труб различных радиусов кривизны.

Можно обеспечивать локальную деформацию концевых участков труб, изменяя траекторию движения пуансона только изменением положения ползуна (с пуансоном) на консольном рычаге. В любом случае траекторией будет дуга окружности, но различного радиуса (перенастройки привода рычагов не требуется).

Новая ковочная машина является оригинальной конструкцией: при рассмотрении патентной заявки экспертиза в результате патентного поиска не нашла прототипа: патент выдан без прототипа.

Выводы по главе 6

1. Рассмотрен процесс локальной деформации полых заготовок. Изучены процессы деформации при потере устойчивости и разработана схема, обеспечивающая устойчивость и стабильность размеров в течение всего процесса.

2. Проведены экспериментальные исследования усилий при деформации полых заготовок, получены данные для проектирования надежных ковочных машин.

3. Спроектированы и изготовлены две ковочные машины, успешно использованные для производства труб с утолщенными концевыми участками.

4. Разработана новая машина для деформации криволинейных труб

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 полезное изменение 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. Научная новизна технических и конструкторских решений защищена патентом РФ №2491144 RU (создание на заготовке локальной деформации углублений малых размеров предотвращает возникновение крупных складок и позволяет в 1,5-2,0 раза увеличить длину изделия без потери устойчивости и образования трещин).

2. 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.

3. 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.

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 В21 J5/08).

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Некоторые проблемы прогнозирования развития металлургической технологии [текст]С.П. Ефименко, В.С. Юсупов // Сталь.1995. №10. С. 69-73.
2. Пименов А.Ф. Обработка давлением металлических материалов [текст]А.Ф. Пименов, А.И. Трайно, Н.И. Ефремов, А.Е. Шелест, Ю.Ф. Тарасевич, Г.Г. Лешкевич, В.М. Пановко, В.С. Юсупов. -М.: Наука, 1990.-239с.
3. Павлов И.М. Обработка металлов давлением[текст]И.М. Павлов, Н.М. Федосов, В.П. Северденко, И.Я. Тарновский, Б.Л. Ланге, Я.М. Охрименко. -М.: Металлургиздат.1955.-483с.
4. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки [текст] / Е.А. Попов. М.: - Машиностроение, 1968.-284с.
5. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке [текст]В.П. Романовский. -Л.: Машиностроение, 1971.-782с.
6. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением[текст] /М.В. Сторожев, Е.А. Попов. М.: -Машиностроение, 1971.-421с.
7. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке [текст]/М.Я. Бровман.М.:Металлургия.1991.-265с.
8. Холодная объемная штамповка. Справочник[текст]/ под ред. Г.А. Навроцкого. М.: Машиностроение, 1973.-496с.
9. Колмогоров В.Л. Напряжение, деформация, разрушение[текст]/ В.Л. Колмогоров.- М.: Металлургия, 1970.-229с.
10. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением М.:Металлургия,1986.-686с.
11. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. Справочник [текст]/В.А. Кроха.-Машиностроение.1980.-157с.

12. Ковка и штамповка: Справочник. Листовая штамповка [текст]/. Под ред. А.Д.Матвеева.-М.:Машиностроение.1985-1987.-544с.
13. Дубинин Н.П. Технология металлов [текст]/Н.П. Дубинин, П.П. Жевтунов, А.Д. Хренов, М.С. Никитин, В.С. Красавин, А.А. Гладилин, А.А. Сыроепин. –М.: «Высшая школа». 1964.-632с.
14. Махалов М.С. Моделирование остаточных напряжений на разных этапах жизненного цикла изделий [текст]/М.С. Махалов, В.Ю. Блюменштейн// Вестник машиностроения. 2014.№ 12.С.21-25.
15. Матвеев Б.Н. Пластичность и сопротивление металлов деформации. Учебное пособие [текст]/ Б.Н. Матвеев, А.П. Петров, А.Е. Шелест.- М.: Министерство образования Российской Федерации. 2003.56с.
16. Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки [текст] Л.А. Шофман. -М.: Машиностроение, 1964.-375с.
17. Головлев В.Д. Расчеты процессов листовой штамповки. Устойчивость формообразования листового металла [текст]/В.Д. Головлев–М.: Машиностроение, 1974.-136с.
18. Аверкиев Ю.А. Технология холодной штамповки [текст]/ Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев.-М.: Машиностроение, 1989.-304с.
19. Толоконников Л.А. О течении фланца заготовки при вытяжке цилиндрического стакана из анизотропного материала [текст] Л.А. Толоконников, В.В. Шевелев, С.П. Яковлев // Прикладная механика, - 1969. Т. V.-№3.С.128-131.
20. Ключников В.Д. Математическая теория пластичности [текст]/ В.Д. Ключников.- М.: Издательство Московского университета, 1979.- 207с.
21. Blasik F.Deep drawing without blank holder [text]/F.Blasik, P. Linhard, I.Strelecky //Sheet Metal Industries. Vol.64. March 1987. - №3 – P.128-138.

22. Бровман М.Я. Новый механизированный ковочный комплекс [текст]/ М.Я. Бровман, А.М. Рудской // Кузнечно-штамповочное производство.-1980. №6. С.29-30.

23. Ерпалов М.В. Освоение технологии высадки концов труб нефтяного сортамента на ОАО «ПНТЗ» [текст] / М.В. Ерпалов, Г.Н. Кондратьева, В.И. Тазетдинов, А.А. Богатов // В сб. «Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии 14-17апреля 2014.-М.: НИТУ «МИСиС», ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина». 2014. С.64÷68.

24. Хван А.Д. Штамп для пластической обработки длинномерных цилиндрических заготовок[текст]/А.Д. Хван, С.А. Баранников // Машиностроитель.2004.№10. С.45-47.

25. Степанский Л.Г. Прессование стальных труб переменного сечения [текст] / Л.Г. Степанский, Н.Г. Морозов // Кузнечно-штамповочное производство.1969.№11.С.8-15.

26.Хайкин С.Э. Физические основы механики [текст] / С.Э. Хайкин-М.: Физматгиз, 1963.-772с.

27. Хилл Р. Математическая теория пластичности[текст]/Р. Хилл М.: Гостеориздат 1956.- 407с.

28.Коротков В.А. Некоторые вопросы комбинированной вытяжки анизотропных материалов.[текст]/ В.А. Коротков // В сб. Технология машиностроения. Труды тульского политехнического института, вып.15.Тула.1971.№15. С.16-21.

29. ЛялинВ.М. О влиянии вида наряду состояния на предельную степень вытяжки анизотропного материала [текст]/В.М. Лялин, А.Е. Шевелев, С.П. Яковлев // В сб. Технология машиностроения. Труды Тульского политехнического института. Тула. ТПИ.-1971.№15.С.7-11.

30. Khelifa M. Fracture in sheet metal forming: Effect of ductile damage evolution [text] / M. Khelifa, M. Oudjene, M. Khename //Computersandstructures.2007.№5 – P.205-212.

31. Яковлев С.П. Плоское напряженное состояние анизотропного тела при условии текучести, зависящим от вида напряженного состояния [текст]/С.П. Яковлев//В сб. Технология машиностроения. Труды Тульского политехнического института. Тула.ТПИ.1971.№ 15.С.3-7.

32. Бунова Г.С. Компьютерное моделирование процесса вытяжки полых стаканчиков из сплавов АМгб с учетом реальной структуры материала [текст]/ Г.С. Бунова, С.В. Воронин, Ф.В. Гречников, В.Д. Юшин //Известия Самарского научного центра РАН. Механика и машиностроение.2009.№3.Т.11.-С.219-224.

33. 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.

34.Пат.RU№2282516РФ,МПК21D 22/10,B21D22/24,B21D28/24,Способ вытяжки деталей и штамп для его осуществления / В.М. Плеханов, А.В. Севастьянов. Заявлено 10.06.2004; опубл. 10.01.2006.Бюл.№24.

35. А.С. № 1800729 СССР, МПК 6B21D51/54 Способ изготовления полого осесимметричного изделия / В.А. Попов. Центральный научно-исследовательский институт материалов. Заявлено 10.04.1990; опубл. 27.06.1995.Бюл.№18.

36. А.С. №454073 С2, МПК7 В21D 22/20, Штамп вытяжной / В.В. Бродко, С.А. Довнар, И.Ф. Куровский. Заявлено 19.05.1972; опубл.25.12.1974. Бюл.№47.

37. Пат.RU2056198 РФ, МПК6 В21D22/20 Способ получения глубоких тонкостенных цилиндрических изделий из многогранных заготовок/ Коротков В.А., Яковлев С.С. Заявл.25.01.1993; опубл.20.03.1996.Бюл. №6.

38. Пат.RU №2261770 С2, МПК7 В21D 22/10, Способ изготовления облицовок сферической формы/ М.А. Бабурин, В.А. Тарасов; В.Д. Баскаков, А.И. Кицак, А.Н. Гасейнов, Н.Н. Телегин ООО «Техноцит»;№ заявки 2001122077. Заявлено 19.12.2003. Опубл. 10.10.2005.Бюл.№28.

39. Пат. RU№2460605 РФ, МПК В21D 22/16, В21D51/16. Способ изготовления оболочек с локальными утолщениями/ Л.П. Логунов. № 201112084. Заявл. 01.06.2011; Опубл.10.09.2012; Бюл.№25.

40. Schöcker D. Enhancing press technology: laser assisted deep drawing [text]/D.Schöcker//International Sheet Metal Review.2000.№4.P.58-60.

41. Сапожникова Ю.А. Гибридные и комбинированные технологии в процессах обработки металлов давлением / Ю.А.Сапожникова, Д. Г. Черников Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 45 www.mai.ru/science/trudy/

42.Зубцов М.Е., Листовая штамповка [текст]/М.Е.Зубцов.- Л.:Машиностроение.1969.-568с.

43. Ерпалов М.В. Освоение технологии высадки концов труб нефтяного сортамента на ОАО «ПНТЗ» [текст]/М.В. Ерпалов, Г.Н. Кондратьева, В.И. Тазетдинов, А.А. Богатов//В сб. докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014.Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии.Ч.2. – М.: ООО «Белый ветер», 2014.С.64-68.

44. Пат. RU№2242318 РФ, МПК 7В21D26/12, В21D 22/20. Способ глубокой импульсной вытяжки деталей/ И.Н. Поздов, К.И. Поздов №2001133564/02. Заявл. 27.08.2003; опубл. 20.12,2009,бюл.№3

45. Слоним А.З. Правка листового и сортового металла [текст]/А.З. Слоним, А.Л. Сонин.-М.: Металлургия. 1981.-231с.

46. Зайдес С.А. Технологическая интенсификация напряженного состояния в стесненных условиях локального нагружения // С.А. Зайдес, К.К. Нго [текст]// Вестник машиностроения. 2017.№3.С.5-8.

47. Берлинер Ю.И. Технология химического и нефтяного машиностроения [текст] / Ю.И. Берлинер, Ю.А. Балашов.-М.: 1976.-117с.

48. Антипов В.Г. Совершенствование производства гнутых профилей дорожных ограждений [текст]/В.Г. Антипов, А.Ф. Афанасьев, В.Н. Гридневский, В.П. Корнилов// Производство проката. 2001. №11. С.19-22.

49. Maksimov E.A., Shatalov R.L. Asymmetric deformation of metal and front flexure of thick sheet in rolling. [text]/ E.A. Maksimov, R.L. Shatalov //Part 1. Steel in Translation. 2012. T. 42. № 5. С. 442-446.

50. Остринский А.С. Определение расчетных параметров листовых роликовых правильных машин [текст]/А.С. Остринский// В сб. Труды ВНИИМЕТМАШ. №18. М.:1966. ОНТИ. С.7-32.

51. Сафьян М.М. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство [текст]/М.М. Сафьян, В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, А.И. Молчанов. – Киев. «Выща школа», 1988.-351с.

52. Маскилейсон А.М. Трубоправильные машины [текст]/ А.М. Маскилейсон, В.И. Сапир, Ю.С. Комиссарчук. М.: Машиностроение.1971.-208с.

53. Короткевич В.П. Непрерывный процесс вальцовки заготовок [текст]/В.П. Короткевич // В сб. докладов четвертой научно-технической конференции молодых специалистов. М.: ВНИИМЕТМАШ. 1972. С.258-269.

54. Орыняк И.В. Анализ деформациигиба трубы на основе смешанного подхода. Сообщение 1. Пространственный изгиб по Сен-Венану [текст]/И.В. Орыняк, С.А. Радченко// Проблемы прочности. 2004.№5. С.23-49.

55. Karman Th. Uber die Formanderung dunn wandiger Rohre ins besondere Ausgleichsrohre [text]/ Th. Karman / Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure.2911.V.55.S.1889-1895.

56. Brazier L.G. On the flexure of thin cylindrical shells and other thin sections [text]/L.G. Brazier. Proclamation of Royal society. Ser.A.1927.№773. P.104-114.

57. Гуляев Г.И. Сравнение традиционной и усовершенствованной технологии производства электросварных труб [текст]/Гуляев Г.И., Давыдов Ф.Д.// Сталь.1996. №1.С.49-50.

58. Колобов А.В. Исследование и усовершенствование непрерывной валковой формовки при производстве электросварных прямошовных труб[текст]/А.В.Колобов// Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. -М.: 2005.-24с.

59. Бровман М.Я. Об упругопластическом изгибе балок в процессе движения[текст]/М. Я. Бровман//Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1982.№3.С.155-160.

60. Винокурский А.Х. Расчет силовых параметров при изгибе полосы вокруг цилиндрических роликов[текст]/ В сб. Исследование процессов правки и термического упрочнения полос. - М.: ОНТИ ВНИИМЕТМАШ.1980.С.14-21.

61. Колесников А.Г. Конструкционные металлические материалы с субмикро-и наноразмерной структурой [текст]/ А. Г. Колесников, А. И. Плохих// В сб. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. С.44-50

62. Асанов Х.Х. Исследование знакопеременных упругопластических изгибов полос [текст]/Х.Х. Асанов, М.И. Федоров// В сб. Исследование процессов правки и термического упрочнения полос.-М.: ОНТИ ВНИИМЕТМАШ. 1980. С.53-62.

63. Бровман М.Я. Оптимальный способ высадки труб// М.Я. Бровман, А.М. Рудской, В.А. Пачин // Металлургическая и горнорудная промышленность,1980,№2. С.21-22.

64. Бровман М.Я. Повышение качества правки прямоугольных и квадратных труб [текст]/М.Я. Бровман, Ю.В. Будников, В.Г. Агтарян, М.И. Чивадзе//Сталь, 1980, №3.С.222-225.

65. Ящерицын П.И. Основы нового способа обеспечения точности формы при изготовлении нежестких плоскостных деталей [текст]/П.И. Ящерицын, В.А. Колот, С.П. Гинкул // В сб. «Технология заготовительного и механосборочного производства. Сборник научных трудов. Краматорск, НИИПТМАШ.1981.С.122-128.

66. Zadira H. Fatigue Life Prediction of Welded Box Structures [text]/H. Zadira, I. Gilbert, A. Boumasa, P. Jodin,Z. Azari, G.Penvinage// Strength of Materials. 2004. № 6. P.17-25.

67. Karamanos S.A. Bending instability of elastic tubes [text] / S.A. Karamanos // International Journal of Solids and Structures.V.39(2002).39.P.2059-2058.

68. Clark R.A. Bending of curved tubes [text] /R.A. Clark, E. Reissner //Advantages of Applied Mechanics //1951.№ 2.P.93-122.

69. Лавриненко В.Ю. Компьютерное моделирование для автоматизации проектирования технологических процессов холодной объемной штамповки [текст]/ В.Ю. Лавриненко// Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 1. С. 37-41.

70. Kobelev O.A., Tsepina M.A., Skripalenko M. M., Popov V.A. Features of Technological Layout of Manufacture of Unique Mono-Block Large-Dimension Plates[text] / O.A. Kobelev, M.A. Tsepina, M.M. Skripalenko, V. A. Popov// Advanced materials research. Vol 59 (2009), p.p. 71-75

71. Шабалов И.П. Влияние технологии формовки листовой заготовки на комплекс механических свойств электросварных труб [текст]/И.П. Шабалов, Г.А. Филиппов, Д.П. Соловьев, О.В. Ливанова // В сб. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии.14-17 апреля.2014г. НИТУ, МИСиС, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина». М.: 2014.С. 17-23.

72. Шинкин В.Н. Моделирование процесса формовки заготовки для труб большого диаметра [текст]/ В.Н. Шинкин, А.П.Коликов // Сталь.2011.№11.С.54-58.

73. Шинкин В.Н. Критерий перегиба в обратную сторону свободной части листовой заготовки на трубоформовочном прессе SMSMEER [текст]/ В.Н. Шинкин, А.М. Барыков //В сб. «Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии. 14-17 апреля 2014г. Москва. М.:НИТУ МИСиС, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина».2014.С.40-45.

74. Шинкин В.Н. Критерий разрушения труб большого диаметра при несплавлении сварного соединения и внутреннем давлении [текст]/В.Н. Шинкин, А.М. Барыков, А.П. Коликов, В.И. Мокроусов // Производство проката. 2012.№2.С.14-16.

75. Самусев С.В. Разработка методики расчета параметров рабочего инструмента линии ТЭСА-1420 для унификации групп сварных труб на участке кромкогибочных агрегатов [текст]/С.В. Самусев, А.В. Люскин // В сб. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии. 14-17 апреля 2014г. Москва. М.: НИТУ МИСиС, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина». 2014,с.108-110.

76. Самусев С.В. Установки физического моделирования процесса формовки стальных прямошовных труб в лабораторном корпусе кафедры ТОТП «НИТУ МИСиС» [текст]/С.В. Самусев, В.А. Фадеев // В сб. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии. 14-17 апреля 2014г. Москва. М.: НИТУ МИСиС, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина». 2014,с.136-143.

77. Ильичев В.Г. Экспериментальное определение сил трения в очаге деформации при формовке труб большого диаметра с малым отношением Д/Н в условиях ОАО «ВТЗ»[текст]/ В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин //В сб. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии.

14-17 апреля 2014г. Москва. М.: НИТУ МИСиС, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина». 2014.с.153-159.

78. Морозов Ю.Д. Разработка высокоэффективных технологий производства толстолистного проката для перспективных проектов магистральных трубопроводов [текст]/ Ю.Д. Морозов, М.Ю. Матросов, О.Н. Чевская // В сб. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии. 14-17 апреля 2014г. Москва. М.: НИТУ МИСиС, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина». 2014.с.263-269.

79. Б.Сен-Венан. Дифференциальные уравнения внутренних движений, возникающих в твердых телах, и граничные условия для этих тел. Некоторые приложения[текст]/Б. Сен-Венан // В сб. Теория пластичности под ред. Ю.Н. Работнова.- М.: Издательство иностранной литературы. 1948.С.24-33.

80.Ильюшин А.А. Пластичность. Часть первая. Упруго-пластические деформации [текст]/А.А.Ильюшин.- М.: Логос.2004.-376с.

81.Соколовский В.В. Теория пластичности [текст]/В.В. Соколовский.- М.: высшая школа. 1969.-608с.

82.Качанов Л.М. Основы теории пластичности [текст]/Л.М. Качанов.- М.: Гостехтеориздат. 1956.-324с.

83. Джонсон В. Механика процессов выдавливания металла [текст]/В. Джонсон, Х. Кудо.-М.: Металлургия.1965.-174с.

84. Кийко И.А. Теория пластического течения[текст]/ И.А. Кийко.-М.: изд. МГУ. 1978.-75с.

85. Ивлев Д.Д. Теория идеальной пластичности [текст]/ Д.Д. Ивлев.- М.: Наука. 1966.- 231с.

86. Бийлард П. Теория пластического изгиба и ее приложение к геофизике[текст]/ П. Бийлард //В сб. Теория пластичности. Сборник статей под ред. Ю.Н. Работнова.- М.: Издательство иностранной литературы. 1948.С.375-391.

87. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов [текст]/А.Д.Томленов.-М.: Металлургия.1972.- 408с.

88. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого тела[текст]/ Ю.Н. Работнов.-М.: Наука, 1979.-744с.

89. Romantsev V.A., Skripalenko M.M., Skripalenko M.N., Zhugulev G.P. Choosing the shape and dimensions of punches for the operation of piercing on a press. [text] / V.A. Romantsev, M.M. Skripalenko, M.N. Skripalenko, G.P Zhugulev. Metallurgist, Volume 55, Numbers 9-10 (2011), p. 504-509

90. Rao K.P. Hot deformation studies on a low-carbon steel. Part1 [text] / K.P. Rao, Y.K. Prasad // Journal of Materials Processing Technology. 1996. V.56. P.897-907.

91. Бровман М.Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки [текст]/М.Я. Бровман.-М.: Металлургия. 1995.-256с.

92. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением[текст]/ Л.Г. Степанский.-М.: Машиностроение. 1977.-215с.

93. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах [текст]/А.И. Целиков. – М.: Металлургиздат. 1962. – 494с.

94. Целиков А.И. Прокатные станы [текст]/А.И. Целиков, В.В. Смирнов.-М.: Металлургиздат. 1953.-430с.

95. Коновалов Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки[текст]/ Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И.Пономарев.-М.:Металлургия.1986.- 429с.

96. Nadai A. High-Speed Tension Tests at Elevated Temperatures [text] / A.Nadai, M. Manjoine //Journal of Applied Mechanics.1946.№6.June.Vol.8.№2 – P.102-121.

97. Шаталов Р.Л. Новые технологии обработки давлением медных и цинковых сплавов [текст]/ Р.Л. Шаталов, Н.А. Мочалов, Н.Ш. Босхамджиев, Г.Н. Кручер.- М.:Теплотехник.2006 -219с.

98. Avitzur B. Metal Forming Processes and Analysis [text] / B. Avitzur.- New Jork. Graw Hill, 1968.1979.-282p.

99. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос [текст]/Ю.В.Коновалов–М.: Теплотехник.2008.-640с.

100. Полухин П.И. Прокатное производство [текст]/П.И.Полухин, Н.М. Федосов, А.А. Королев, Ю.М. Матвеев.-М.: Металлургиздат.1960.-966с.

101. Зайков М.А. Процесс прокатки [текст]/ М.А. Зайков, В.П. Полухин, А.М. Зайков, Л.Н. Смирнов. – М.: МИСиС. 2004.-639с.

102. Железнов Ю.Д. Прокатка тонких листов и полос [текст]/Ю.Д. Железнов.- М.:Металлургия.1971.-197с.

103. Alexander I.M. Slip-line Field for Hot Rolling Process [text]/I.M. Alexander //Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering, 1955.Vol.169 №1.P.1021-1030.

104. Lueg W. Die Vorgänge im Walzspalt und ihre Rückwirkung auf Walzkraft und Drehmoment beim Warmwalzen [text]/W.Lueg, G.Müller//Stahl und Eisen. Oktober.1956.S.57-69.

105.Жарков В.А. Испытания материалов. Одноугловая гибка листов и широких полос[текст]/ В.А. Жарков// Технология машиностроения.- 2018.№2.-С.41-48.

106. Бердичевский В.Л. Вариационные принципы механики сплошной среды [текст]/ В.Л. Бердичевский. М.: Наука. 1983.-447с.

107. Авицур В. Применение метода верхней границы к задачам плоской деформации при использовании полей скоростей прямолинейного и вращательного движения. Часть 1. Основные понятия [текст]/ В. Авицур, В. Пахля // Конструирование и технология машиностроения. – 1986.№4. – С. 146-162.

108. Васидзу К. Вариационные методы в теории пластичности [текст]/ К.Васидзу:-М.: Мир.1987.-542с.

109. Авицур В. Формоизменение кольца: метод верхней оценки. Часть I [текст]/ В. Авицур // Конструирование и технология машиностроения. – М.: Мир, 1982. №3.С.126-132.

110. Durban D. Radial flow simulation of drawing and extrusion of rigid hardening materials [text]/ D. Durban // International Journal of Mechanical Sciences. 1983.V.25.№1.P.27-40.

111. Samanta S.K. The Application of the Upper Bound Theorem to the Prediction of Indenting and Compressing Loads for Circular and Rectangular Discs [text]/ S.K. Samanta // Acta Polytechnica Scandinavica. – 1968. Ser.№ 38.P.136-145.

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

113. Бровман Т.В. Кинематически допустимые поля скоростей при радиальном обжатии цилиндрических заготовок. Сообщение 2.[текст]/ Т.В. Бровман// Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1993.№7.С. 29-33.

114. Марков А.А. О вариационных принципах в теории пластичности [текст]/ А.А. Марков // Прикладная математика и механика. 1947. Т.11.№3.-С. 339-350.

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

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

117. Васильев М.Г. Исследование и совершенствование технологического процесса листовой штамповки с целью повышения

качества стальных полых цилиндрических изделий, получаемых глубокой вытяжкой [текст]/ М.Г. Васильев – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.- М.: Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. 2014.- 117с.

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

119. Серенсерт С.В. Справочник машиностроителя. Том 3[текст]/ Под ред. Н.С. Ачеркана. М.: Машгиз.- 1962. – 621с.

120. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин. Справочник[текст]/ И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич.- М.: Машиностроение.- 1979.-702с.

121.Геккелер И.В. Статика упругого тела.[текст]/ И.В. Геккелер.- М.: ОНТИ Государственное технико-теоретическое издательство. 1934. – 287с.

122. Патент № 2491144RU(11) С2 Российская федерация, В21D 22/20 (2006.01). Способ изготовления полых цилиндрических изделий [текст]/ Т.В. Бровман, А.Б. Горященко, М.Г. Васильев, С.С. Ухабов, заявлено 08.06.2011, опубликовано 27.08.2013. Бюллетень №24.

123. Brovman T.V. New technological process of drawing [text]/Т.В. Brovman, M.G. Vasiljev// Journal of Harmonized Research (Johr). 2014.№ 2.P. 201-207.

124. Brovman T.V. Design of welded double layer pipelines /[text]Т.В. Brovman Welding International. 2012. Т. 26. № 7. С. 553-554.

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

126. Пат. RU 2554247 С2, РФ, МПК В21 D 22 /20 Способ изготовления тонкостенных изделий/[текст] Т.В. Бровман (заявка 201349429/02) опубл. 27.06.2016 Бюл. №18.

127. Ржаницын А. Р. Составные стержни и пластины [текст]/А.Р. Ржаницын. - М.: Стройиздат. 1986.-316 с.

128. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник [текст]/ Е.С. Вентцель. - 11-е изд., стер. - М.: КНОРУС, 2010. - 664 с.

129. Пат. RU № 2556172 РФ, МПК В21 D22/20. (13) С1 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.

130. Пат. RU № 2608153 РФ, МПК В21D15/02 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.

131. Пат. RU 2554247 С2, РФ, МПК В21 D 22 /20 Способ изготовления тонкостенных изделий/ Т.В. Бровман (заявка 201349429/02) опубл. 27.06.2016 .Бюл. №18.

132. Бровман Т.В. Повышение точности при изготовлении криволинейных металлических заготовок деформацией изгиба[текст]/Т.В. Бровман, А.А. Кутузов // Металлы, 2016. №5. С.34-38.

133. Бровман Т.В. Усилия при локальной деформации полых заготовок [текст] /Т.В. Бровман//Технология металлов. 2015. № 6. С. 9-13.

134. 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.

135. Бровман Т.В. Локальная пластическая деформация полых заготовок[текст]/ Бровман Т.В., Бабенко Н.Е.// Металлы. 2014. № 4. С. 23-29. [Brovman T.V., Babenko N.E. Local plastic deformation of hollow billets/[text]T.V. Brovman, N.E. Babenko Russian metallurgy (Metally).2014. T. 2014. № 7. С. 521-526].

136. Бровман Т.В. 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.

137. Brovman T.V. Design of welded double layer pipelines /Brovman T.V.[text]//Welding International. 2012. T. 26. № 7. С. 553-554.

138. 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.

139. Малов А.Н. Технология листовой штамповки [текст]/А.Н. Малов.- М.: Машиностроение, 1969.-568с.

140.Бровман Т.В. Локальная деформация труб с криволинейными осями// Сборник материалов DFMN-2015 VI – Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». 10-13 ноября 2015 г. Москва, ИМЕТ РАН.- С.336.

141. Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Под ред. Ф.В. Гречникова. - М.: Металлургия, 1990. - 304 с.

142. Бровман Т.В. Ковочная машина для деформирования концевых участков криволинейных труб[текст]/ Т.В. Бровман, Н.Е. Бабенко – Патент РФ№2547977 МПК В21J5/08. Бюллетень изобретений 2015, №10.

143. Аракельянц С.М. Новые гидроцилиндры для мобильных машин [текст] / С.М. Аракельянц, С.В. Дементьев // Строительные и дорожные машины. 2004. №8. С.31-32

144. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л. Выдавливание цилиндрических стаканов полым пуансоном. Часть II / Прессование / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // Производство проката. Ежемес. произв. и науч. журнал . – 15/09/2004 . - N 9 . - с. 33-38 .

145. Дмитриев, А. М. Холодное выдавливание конических стаканов с цилиндрической полостью[текст]/ А. М. Дмитриев, Н. В. Коробова, Н. С. Толмачев // Научно-технические технологии в машиностроении. - 2016. - № 1. - С. 8-14.

146. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек[текст] /С.П. Тимошенко. М.: Наука, 1971,с.457-472.

147. 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.

148 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.

149. Самусев С.В. Установки физического моделирования процесса формовки сварных прямошовных труб в лабораторном комплексе кафедры ТОП «НИТУ МИСИС»/ С.В. Самусев, В.А. Фадеев// В сб. докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014.Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии.Ч.2. – М.: ООО «Белый ветер», 2014.С.136-143.

150. Данченко В.Н., Коликов А.П., Романцев Б.А., Самусев С.В. Технология трубного производства. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 640 с.

151. Аракельянц С.М. Новые гидроцилиндры для мобильных машин [текст] / С.М. Аракельянц, С.В. Дементьев // Строительные и дорожные машины. 2004. №8. С.31-32

152. Скрипкин А.Ю., Соколова О.В., Серавкин А.А. Исследование кривизны траектории средней линии трубной заготовки при производстве электросварных труб. Третья конференция молодых специалистов «Металлургия XXI века», 13-16 февраля 2007 г.

153. ГОСТ 19904-90 (СТ СЭВ 1968-79) Прокат листовой холоднокатаный сортамент – М.: Издательство стандартов, 1987.-20с.

154. Патент № 2561937 RU(11) С1 Российская федерация, В21D 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.

155. 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.

Приложение 1

Таблица 1 – Экспериментальные данные по величинам усилий при деформации труб из стали 36Г2С диаметрами 64мм, $P_m = 0,6$ МН

	У силie P , МН	Отклонение от средней величины ΔP , МН	№	У силie P , МН	Отклонение от средней величины ΔP , МН
1	0,46	-0,14	24	0,55	-0,05
2	0,51	-0,09	25	0,58	-0,02
3	0,52	-0,08	26	0,60	0
4	0,48	-0,12	27	0,65	0,05
5	0,59	-0,01	28	0,60	0
6	0,50	-0,10	29	0,58	-0,02
7	0,57	-0,03	30	0,55	-0,05
8	0,48	-0,12	31	0,57	-0,03
9	0,61	0,01	32	0,68	0,08
10	0,58	-0,02	33	0,60	0
11	0,55	-0,05	34	0,56	-0,04
12	0,48	-0,12	35	0,65	0,05
13	0,61	0,01	36	0,58	-0,02
14	0,49	-0,11	37	0,59	-0,01
15	0,60	0	38	0,60	0
16	0,58	-0,02	39	0,63	0,03
17	0,53	-0,03	40	0,65	0,05
18	0,52	-0,08	41	0,62	0,02
19	0,51	-0,09	42	0,68	0,08
20	0,49	-0,11	43	0,60	0
21	0,50	-0,10	44	0,65	0,05
22	0,44	-0,16	45	0,61	0,01
23	0,47	-0,13	46	0,70	0,10

Приложение 2

Таблица 1 - Экспериментальные данные по величинам усилий при деформации труб из углеродистой стали диаметрами 60мм, толщиной 5 мм с диаметрами фланцев 70-74мм

№	Усилие Р, МН	Отклонение от средней величины ΔР, МН	№	Усилие Р, МН	Отклонение от средней величины ΔР, МН
1	0,87	-0,07	24	0,88	-0,06
2	0,92	-0,02	25	0,95	0,01
3	0,88	-0,06	26	0,93	-0,01
4	0,95	0,01	27	1,00	0,06
5	0,93	-0,01	28	0,87	0,07
6	0,94	0	29	0,94	0
7	0,96	0,02	30	0,97	0,03
8	0,87	-0,07	31	0,88	-0,06
9	0,98	0,04	32	1,10	0,16
10	0,94	0	33	0,95	0,01
11	0,91	-0,03	34	0,93	-0,01
12	0,88	-0,06	35	0,99	0,05
13	0,98	0,04	36	0,91	-0,03
14	0,92	-0,02	37	0,87	-0,07
15	0,97	0,03	38	0,92	-0,02
16	0,94	0	39	0,95	0,01
17	0,92	-0,02	40	0,90	-0,04
18	0,96	0,02	41	0,93	-0,01
19	0,95	0,01	42	0,97	0,03
20	0,98	0,04	43	0,97	0,03
21	0,92	-0,02	44	0,93	-0,01
22	0,90	-0,04	45	0,99	0,05
23	0,97	0,03	46	1,00	0,06