

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

С. И. Феоктистов

Б. Н. Марьин

С. Б. Марьин

Д. Г. Колыхалов

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ТРУБОПРОВОДОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Утверждено в качестве учебного пособия

Ученым советом Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Комсомольск-на-Амуре
2013

УДК 629.73.063:621.643(07)

ББК 39.52-06я7

T338

Рецензенты:

А. А. Буренин, доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН, директор Института машиноведения
и металлургии ДВО РАН;

Р. Ф. Крупский, кандидат технических наук, начальник
Научно-производственного отдела
Филиала ОАО «Компания «Сухой» «Комсомольский-на-Амуре
авиационный завод им. Ю.А. Гагарина»

**Теория и практика изготовления элементов трубопроводов лета-
T338 тельных аппаратов** : учеб. пособие / С. И. Феоктистов, Б. Н. Марь-
ин, С. Б. Марьин, Д. Г. Колыхалов ; под общ. ред. С. И. Феоктистова. –
Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – 88 с.

ISBN 978-5-7765-1002-1

В пособии изложены основные способы изготовления элементов трубопроводных коммуникаций из высокопрочных сталей, титановых сплавов и новых типов соединений, приведены проверенные на практике методы расчета и проектирования. Рассмотрены новые перспективные методы формообразования трубных заготовок.

Предназначено для студентов специальности 160100 – «Самолёто- и вертолётостроение» всех форм обучения при изучении дисциплин «Основы производства» и «Технология производства самолета (вертолета)», при выполнении курсовых и дипломных проектов.

УДК 629.73.063:621.643(07)

ББК 39.52-06я7

ISBN 978-5-7765-1002-1

© ФГБОУ ВПО «Комсомольский-
на-Амуре государственный
технический университет»,
2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. НАЗНАЧЕНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ ТРУБОПРОВОДОВ.....	5
2. РАСКРОЙ И ПОДГОТОВКА ЗАГОТОВОК ТРУБ И ПАТРУБКОВ.....	9
2.1. Раскрой труб на заготовки.....	9
2.2. Отрезка труб.....	11
2.3. Механическая обработка концов труб.....	13
3. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУБ.....	23
3.1. Гибка труб	23
3.2. Формообразование элементов трубопроводов.....	34
3.3. Калибровка концов труб и патрубков	51
3.4. Зиговка концов труб	58
3.5. Отбортовка отверстий в трубах и патрубках	60
3.6. Устройство для испытания трубных заготовок.....	64
4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК.....	66
4.1. Общие положения и исходная система уравнений.....	66
4.2. Уравнения равновесия.....	67
4.3. Интегральные уравнения напряженно-деформированного состояния трубчатой заготовки.....	69
4.4. Порядок расчета технологических процессов формоизменения трубчатых заготовок. Сопоставление полученных результатов..	72
5. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ СПОСОБЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК.....	74
5.1. Современные прогрессивные технологии.....	74
5.2. Использование возможностей воды при её замораживании для деформирования трубчатых заготовок.....	75
5.3. Формообразование элементов трубопроводов с использованием стержней из снега и льда	76
5.4. Проведение эксперимента по формообразованию трубчатых заготовок.....	77
6. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК.....	79
6.1. Программа конечно-элементного анализа QForm.....	79
6.2. Подготовка 3D-моделей.....	81
6.3. Работа постпроцессора и конечно-элементный анализ.....	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	86
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	87

ВВЕДЕНИЕ

Гидравлические, газовые и топливные системы широко используются в авиации. Все современные самолеты оборудованы гидрогазовыми системами, предназначенными для выполнения таких жизненно важных функций, как управление самолетом в воздухе и на земле, управление взлетно-посадочными устройствами, аварийное управление. В современных самолетах общая длина трубопроводов топливных, масляных, воздушных и других коммуникаций достигает нескольких километров. Трубы широко применяются и как конструкционно-силовые элементы – тяги управления самолетом и двигателем, звенья силовых нервюр и шпангоутов. Надежность этих систем в значительной степени определяет надежность самолета в целом.

Трубопроводы работают в условиях сложного нагружения. Они испытывают действие высокого давления, пульсирующей нагрузки и гидравлических ударов, поэтому процессы изготовления элементов трубопровода должны обеспечивать высокие и стабильные механические свойства материала труб, высокую чистоту внутренней и внешней поверхностей, минимального утонения и искажения формы сечения трубопроводов.

В авиационной промышленности уделяется большое значение разработке таких способов изготовления трубопроводов из алюминиевых, титановых сплавов и из высокопрочных нержавеющей сталей, которые могли бы обеспечить высокое и стабильное качество. Эти процессы должны обладать технологической гибкостью и управляемостью, легко механизироваться и автоматизироваться, а оборудование для их выполнения должно быть универсальным, мобильным, недорогим и недефицитным.

В настоящем пособии изложены основные способы изготовления элементов трубопроводных коммуникаций из высокопрочных сталей, титановых сплавов и новых типов соединений, приведены проверенные на практике методы расчета и проектирования.

Изложенные в книге материалы будут способствовать углублению знаний студентов, обучающихся по специальности 160100 «Самолето-и вертолётостроение» всех форм обучения, при изучении дисциплин «Основы производства», «Технология производства самолета (вертолета)», помогут лучше понять проблемы современного самолетостроительного производства.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Трубопроводные магистрали гидрогазовых систем летательных аппаратов (ЛА) предназначены для соединения источников энергии систем (насосов, гидроаккумуляторов, баллонов) с потребителями энергии или исполнительными механизмами. Эта связь осуществляется подачей от источников к потребителям рабочего вещества (жидкости или газа) под давлением через управляющие и распределительные устройства по системе трубопроводов. Трубное круглое сечение является весьма рациональным как по площади проходного сечения, так и по его жесткости. При заданном периметре круглая труба имеет максимальную площадь проходного сечения, поэтому она является незаменимой при проектировании или строительстве трубопроводов различных систем и назначения. Кроме того, круглое сечение трубы имеет большой момент инерции, характеризующий его жесткость, и поэтому трубы часто применяются в качестве основных и вспомогательных силовых элементов.

Трубопроводные системы относятся к конструкциям ответственного назначения, от надежности которых зависит безотказность и ресурс изделия. Вследствие этого к деталям трубопроводов предъявляются жесткие требования по точности изготовления [1]. Отклонение от круглости сечения (овальность) должно лежать в пределах от 3 до 10 % в зависимости от длины детали и ее функционального назначения. Наличие гофров на трубах гидравлических систем недопустимо. Допустимое утонение стенки в зонегиба трубы принимается не более 15 – 20 % от действительной толщины стенки трубы. Для ответственных патрубков чистота поверхности должна быть Rz 2,5. Волнистость разрешается только с плавным переходом: поперечная с шагом 5 мм, продольная с шагом 10 мм.

Материалом для труб служат, в зависимости от назначения и внутреннего давления, алюминиевые сплавы (АМцМ, АМгМ, АМг-бТ, Д16, В95), нержавеющие стали, медь, латунь, бронза и углеродистые стали. Наряду с традиционными материалами все шире используются титановые сплавы (ОТ4, ОТ41, ВТ14, ВТ20 и т.д.), особенно для систем ответственного назначения. Титановые сплавы обладают более высокими характеристиками удельной прочности по сравнению с алюминиевыми сплавами и сталями, высокой коррозионной стойкостью и усталостным сопротивлением и отличаются возможностью эффективного использования в условиях повышенных температур, при которых применение алюминиевых сплавов невозможно или нецелесообразно. Особенно актуально использование титановых сплавов в трубопроводах высокого давления, в которых алюминиевые сплавы становятся неработоспособными, а стали не могут конкурировать из-за меньших удельных прочностных характеристик, либо в трубопроводах, работающих с агрессивными средами.

По технологическим признакам детали из труб можно разбить на три подгруппы: прямые (рис. 1.1, а); изогнутые в одной плоскости (рис. 1.1, б); изогнутые в нескольких плоскостях (рис. 1.1, в). Последующими признаками технологической классификации может служить заделка концов труб: прямой 1, косой 2, или фасонный срез 3, развальцовка 4, обжатие 5, сплющивание 6 или вырезы в стенках 7. В зависимости от функций, выполняемых бортовыми системами, в трубопроводах находятся под давлением различные типы жидкостей или газов.

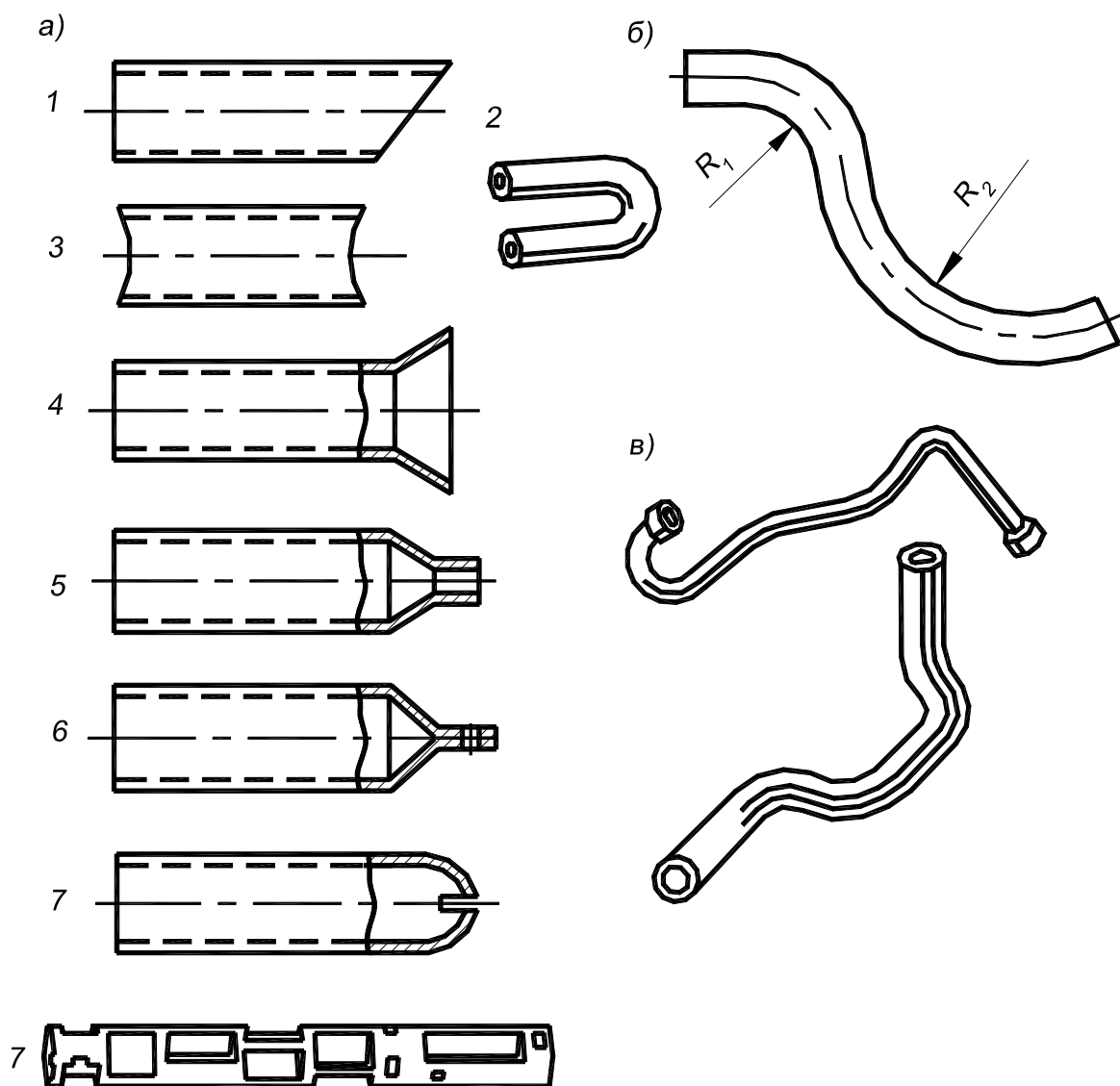


Рис. 1.1. Технологическая классификация деталей из труб: а – прямые; б – изогнутые в одной плоскости; в – изогнутые в двух плоскостях:
 1 – с прямым торцом; 2 – с косым торцом; 3 – с фасонным торцом; 4 – с развальцованным концом; 5 – с обжатым концом; 6 – со сплюсненным концом; 7 – с вырезами в стенках

Например, в топливных системах применяется керосин Т-1 или бензин Б-70, в гидравлических – минеральное масло АМГ-10, в воздушных – сжатый воздух или азот. Рабочее давление в трубопроводах современных самолетов и вертолетов может достигать значительных величин. Например, в гидравлических системах используются рабочие давления порядка 16...24 МПа. Газогазовые системы работают при давлении 15 МПа. При относительно низком давлении работают топливные, масляные, противообледенительные, высотные и другие системы.

Широкое применение в конструкциях трубопроводных систем находят детали с раструбом, фланцем на конце либо тороидальной законцовкой, ступенчатые детали, различные переходники (рис. 1.2).

Для соединения отдельных труб и деталей используются соединительная арматура и уплотнительные детали (кольца, прокладки), изготавливаемые из металла или различных эластичных неметаллических материалов. На рис. 1.3 приведена классификационная схема основных групп и типов соединений трубопроводов и патрубков. В настоящее время используются соединения трубопроводов самого различного типа, которые можно подразделить на три группы: разъемные, неразъемные и комбинированные.

К первой группе относятся все виды паяных и сварных соединений. Соединения этого типа наиболее просты по конструкции, но не допускают ремонта трубопроводных коммуникаций.

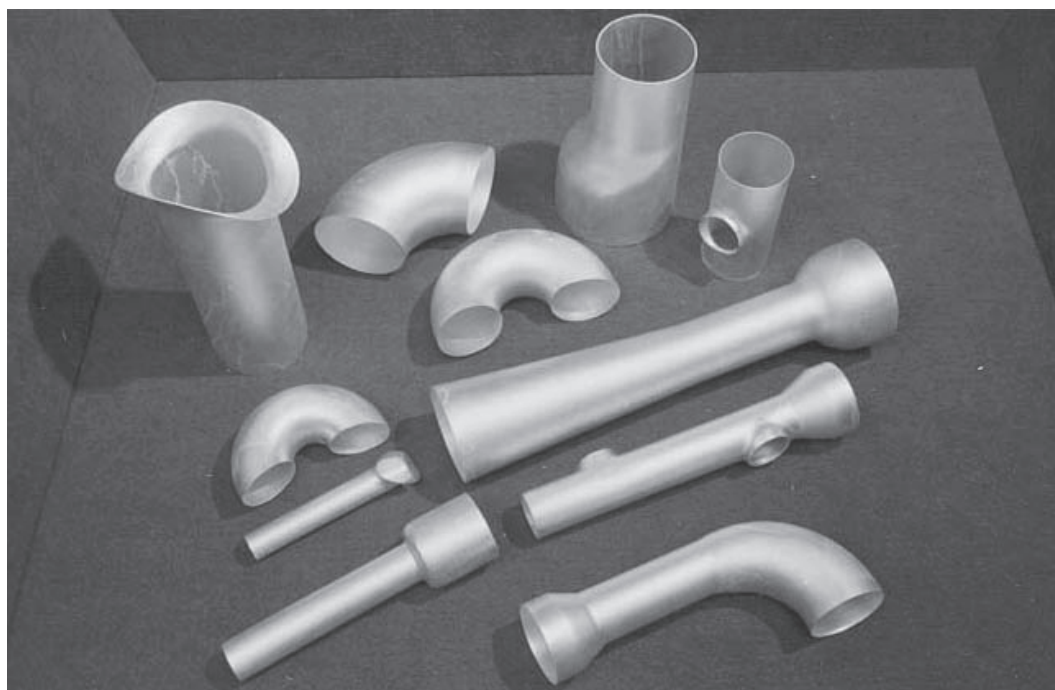


Рис. 1.2. Элементы гидрогазовых систем самолета

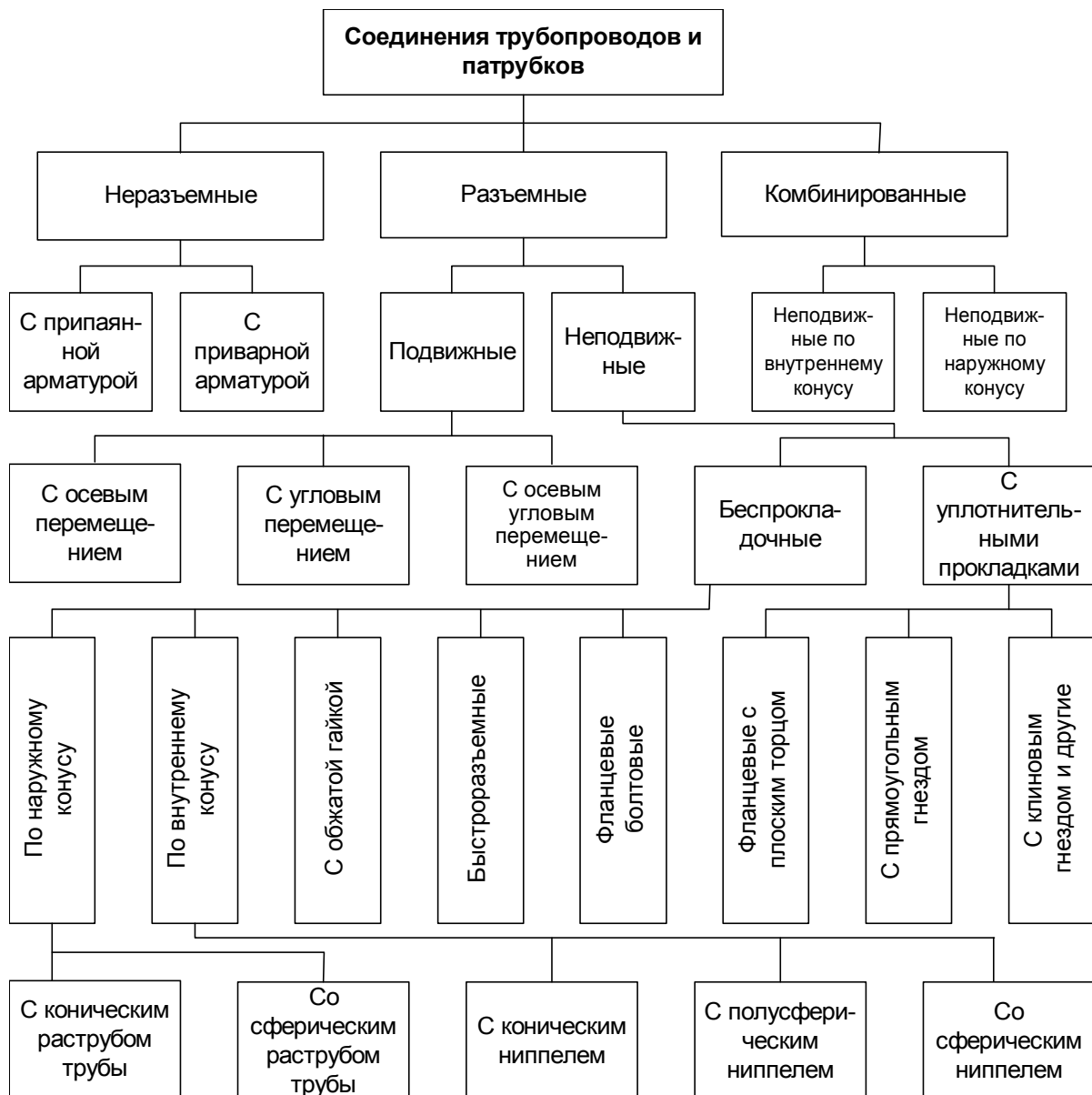


Рис. 1.3. Классификационная схема основных групп и типов соединений трубопроводов и патрубков

Во вторую группу входят разъемные соединения всех типов, которые могут быть собраны и демонтированы без применения каких-либо технологических приемов, связанных с исправлением элементов соединения. Допускается замена уплотнительных элементов (колец, прокладок и т.д.).

Рассмотрим подробнее все основные этапы изготовления труб и патрубков. Разъемные соединения могут быть подвижными и неподвижными. К подвижным относятся соединения, у которых во время работы изделия происходит относительное перемещение контактных поверхностей, обеспечивающих герметичность. С помощью подвижных соединений компенсируются осевые и угловые неточности, во время сборки коммуникаций в

месте соединения трубопроводов, а также термическое расширение последних. К подвижным соединениям относятся телескопические соединения различного типа.

В разъемных неподвижных соединениях контактирующие поверхности не испытывают относительных перемещений во время работы системы. С помощью этих соединений нельзя компенсировать неточность изготовления и термические изменения коммуникаций. К соединениям такого типа относятся различные беспрокладочные соединения по внутреннему и наружному конусам, быстроразъемные беспрокладочные соединения, фланцевые соединения, а также соединения с уплотнительными элементами.

Комбинированные соединения трубопроводов составляют третью группу. Эти соединения по герметичности так же надежны, как и неразъемные, но в то же время допускают переборки. Комбинированные соединения предназначены для стыковки трубопроводов, транспортирующих агрессивные среды, а также для работы в условиях вакуума.

Изготовление труб и патрубков состоит из сложного комплекса работ: раскройно-заготовительных, гибочных, работ по формообразованию элементов патрубков, сборочных и сварочных, промывочно-испытательных.

2. РАСКРОЙ И ПОДГОТОВКА ЗАГОТОВОК ТРУБ И ПАТРУБКОВ

2.1. Раскрой труб на заготовки

Трубы, поступающие с металлургических заводов, и трубные заготовки, изготавливаемые из листа, нарезаются на заготовки заданной длины с обеспечением требуемой чистоты реза и перпендикулярности торца к оси трубы. Длина заготовки при резке труб определяется по развертке труб эталонной детали с учетом технологических припусков.

Длина развертки эталонной трубы без технологических припусков определяется одним из следующих способов:

1) по расчетной формуле

$$L_{разв} = \pi R_1 \alpha_1 / 180 + \pi R_2 \alpha_2 / 180 + \dots + \pi R_n \alpha_n / 180 + L_1 + L_2 + \dots + L_n,$$

где $L_{разв}$ – длина развертки эталонной детали, мм; $\pi R_n \alpha_n / 180$ – длина участка, мм; $L_1 \dots L_n$ – длина прямых участков, мм; $R_1 \dots R_n$ – радиус изгиба трубы по средней линии, мм; $\alpha_1 \dots \alpha_n$ – угол изгиба, град.

Схема изогнутой трубы приведена на рис. 2.1;

2) замером длины развертки эталонной детали с помощью универсальных координатно-измерительных машин и специализированных координатно-измерительных комплексов;

3) расчетом длины развертки эталонной детали, состоящей из стандартных элементов:

$$L_{разв} = L_1 + L_2 + \dots + L_n,$$

где $L_{разв}$ – длина развертки эталонной детали, мм; $L_1, L_2 \dots L_n$ – длины стандартных элементов;

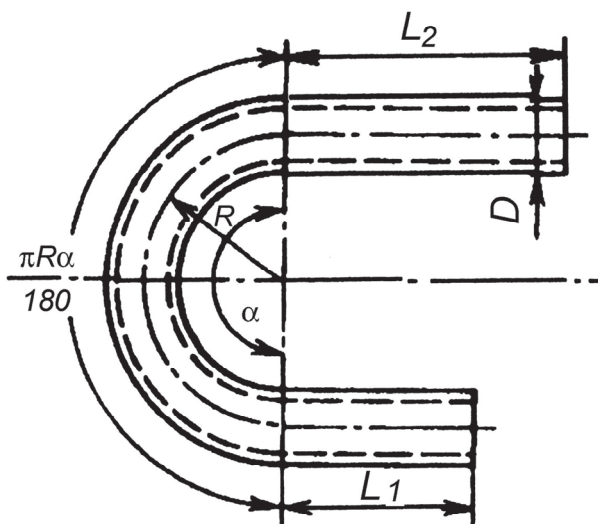


Рис. 2.1. Схема изогнутой трубы

4) замером длины развертки эталонной детали с помощью шнура. Причем для труб диаметром до 8 мм замер производится через внутреннюю полость трубы или методом наложения, а для труб диаметром свыше 8 мм замер длины развертки эталона осуществляется по внешнему контуру элемента;

5) расчетом длины развертки эталонной длины, для чего из точно замеренной длины заготовки трубы вычитается длина отрезанного припуска;

6) замером длины развертки эталонной детали специальным прибором для измерения длины кривых линий, например курвиметром.

В зависимости от марки материала, диаметра, толщины стенки и технологического процесса изготовления труб резка на заготовки производится: в номинальный размер детали, с технологическим припуском на один конец, с технологическим припуском на оба конца.

Резку трубы диаметром до 50 мм рекомендуется производить на специальных трубоотрезных станках типа СРТ, до 100 мм – на трубоотрезных станках с ручной подачей инструмента. Резку труб диаметром свыше 100 мм рекомендуется производить на станках с обегаящей фрезой (алмазным или вулканитовым кругом), на роликовых ножницах или вручную.

Для резки труб из титановых, алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей используются специальные трубоотрезные станки типа СРТ-50. В качестве инструмента для резки труб из титановых сплавов используют алмазный отрезной круг диаметром 400 мм, алюминиевых сплавов – фрезы отрезные диаметром 200 мм, нержавеющей сталей – абразивный круг на бакелитовой основе диаметром 400 мм. Резку труб из титановых сплавов и нержавеющей сталей рекомендуется производить с обильным охлаждением зоны резки.

Режимы резания назначаются в зависимости от марки материала труб (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Режимы резания

Материал трубы	Скорость резания, м/с	Подача, мм/мин	Охлаждение
Алюминиевые сплавы	170	500	Без охлаждения
Нержавеющие стали	30 – 40	120 – 200	Обильное охлаждение
Титановые сплавы	20	80 – 120	Обильное охлаждение

Обрезка технологического припуска перпендикулярно к оси детали производится на станках типа СРТ в зоне прямого участка: длиной не менее 100 мм для криволинейных патрубков и длиной не менее 50 мм для изогнутых труб. Обрезка припусков под углом к оси детали производится на трёхкоординатном программном станке с инструментальным магазином ёмкостью 3...5 единиц и системой управления микропроцессорной стойкой или по разметке на абразивно-отрезном станке.

2.2. Отрезка труб

В зависимости от толщины, диаметра, длины, материала заготовки и масштаба производства отрезка труб может выполняться в штампах, на дисковых пилах, на анодно-механических станках, на абразивных отрезных станках или на специальных трубоотрезных станках.

Наиболее распространенным методом является резка труб на маятниковых дисковых плитах, применяемых для резки профилей. Резка труб из цветных металлов осуществляется на нормальных дисковых фрезях, применяемых для резки профилей. Трубы из углеродистых, нержавеющих и легированных сталей разрезают также на маятниковых пилах, но вместо дисковой фрезы устанавливают абразивные диски с вулканитовой связкой. Скорость резания вулканитовыми кругами составляет 80...100 м/с, минимальная толщина круга должна находиться в пределах 0,8 мм. Хрупкие, тонкие разрезные абразивные круги при осевых биениях заготовки или круга разрушаются. Поэтому в механизме качающегося рычага маятниковой пилы все зазоры должны быть тщательно выбраны. Лучшие результаты дают отрезные станки, у которых ось режущего диска зафиксирована в неподвижно закрепленных подшипниках, а заготовка закрепляется на суппорте, передвигающемся в процессе подачи без люфтов по хорошо пришабренным направляющим.

На дисковых пилах можно резать трубы различных размеров по диаметру, толщине стенки и длине. На этих же пилах, пользуясь поворотом стола, осуществляется резка косых торцов на заготовках труб, что дает экономию материала и упрощает технологию их изготовления. Резка труб

на ленточных пилах менее производительна, дает меньшую точность по длине и более опасна при резке коротких заготовок (длиной до 50 мм).

Короткие заготовки труб длиной до 150...200 мм с толщиной стенки более 2 мм целесообразно разрезать на обычных револьверных или токарно-отрезных станках. Заготовки, отрезанные на этих станках, имеют чистую поверхность среза и почти не имеют заусенцев. Длина заготовки и перпендикулярность плоскости среза получаются более точными, чем при резке на маятниковых и ленточных пилах, но трудоемкость резки выше в 3...5 раз.

Отечественные трубоотрезные станки позволяют отрезать трубы диаметром от 60 до 280 мм. Заготовка вводится внутрь шпинделя и зажимается самоцентрирующими пневматическими тисками. Отрезные резцы устанавливаются на вращающейся планшайбе, на которой смонтирован и механизм подачи резцов. Подача происходит с каждым поворотом планшайбы. Резку труб из титановых сплавов можно производить абразивным диском на анодно-механических станках, ленточных пилах, токарных и трубоотрезных станках. Поскольку острые кромки на торцах отрезанных труб из титана с заусенцами и микроскопическими трещинами недопустимы, их торцуют на специальных торцовочных станочках, снимающих фаски с внутренней и наружной поверхностей кромки торца.

Анодно-механические станки даже при резке тонкостенных труб не деформируют деталь и дают чистый, без заусенцев, срез. При массовом или крупносерийном производстве коротких заготовок труб (с толщиной стенки до 3 мм и длиной не более 150...200 мм) применяют специальные разрезные штампы, устанавливаемые на эксцентриковых или кривошипных прессах.

При резке на дисковых пилах и абразивных кругах косые срезы получают установкой заготовки под углом к диску одновременно с отрезкой по длине. Если второй торец трубы прямой, то заготовку с прямыми торцами режут сразу на две длины детали, а затем, поворачивая на требуемый угол стол пилы, разрезают заготовку пополам. Этот прием позволяет за два реза получить две детали и уменьшить расход материала.

Фасонная отрезка концов труб из легких сплавов при небольших заказах может быть выполнена на вертикально-фрезерных станках типа ДФ-97 (с верхним расположением шпинделя) или ДФ-98 (с нижним расположением шпинделя) по копиру – аналогично фасонному торцеванию профилей.

При больших масштабах производства применяются обечные штампы (рис. 2.2), одинаково пригодные для стальных труб и для труб из легких сплавов. Заготовка *б* надевается на дорн 2, фиксирующий сечение от смятия. Зазор между пуансоном 1, матрицей 5 и дорном 2, выполняющим функции матрицы при отрезке верхней половины сечения, обеспечивается фиксацией дорна на пальце 3. Левая (по чертежу) выступающая

стенка штампа воспринимает боковые усилия отрезки. Рабочая часть пуансона выполнена в виде полукруглой выточки с радиусом кривизны, несколько большим наружного радиуса заготовки.

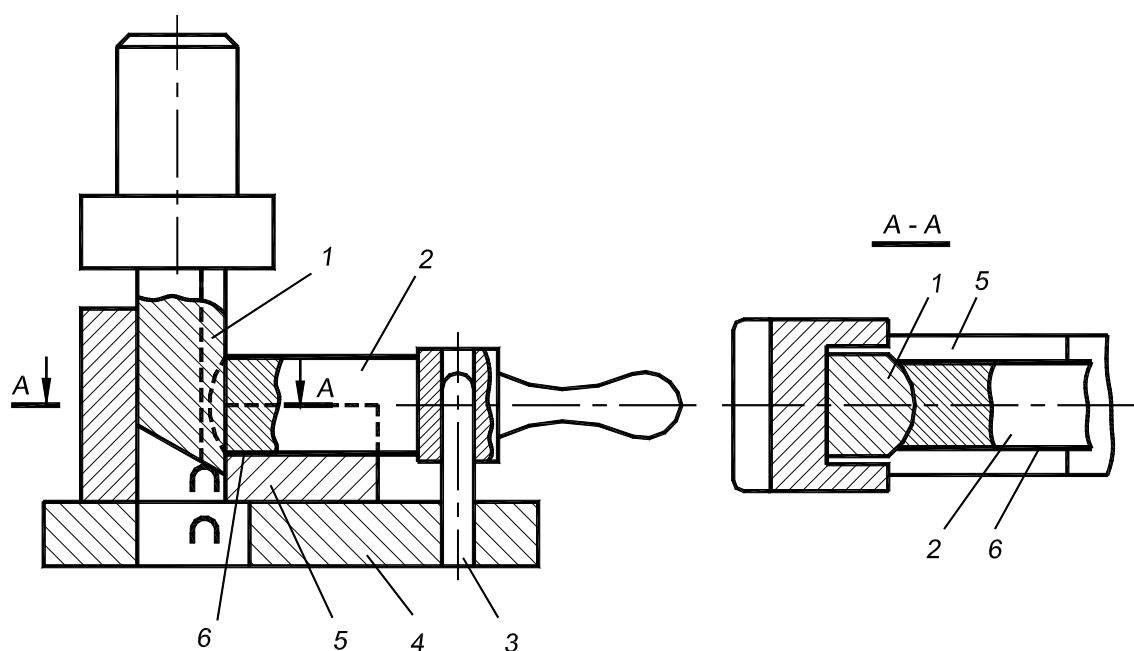


Рис. 2.2. Штамп для фасонной обрезки труб:
1 – пуансон; 2 – дорн; 3 – палец; 4 – нижняя плита;
5 – матрица; 6 – заготовка

Просечка продольных пазов на концах труб, необходимых, в частности, для приваривания ушковых наконечников, выполняется в штампах. При небольших объемах производства вырезку пазов можно осуществлять на горизонтальных и вертикальных фрезерных станках пальцевыми или дисковыми фрезами. В этом случае трудоемкость изготовления значительно увеличивается. Прорези различной формы в стенках труб можно прошивать с помощью комплекта электродов на электроискровых станках или прорезать дисковыми фрезами по разметке или бумажным шаблонам, наклеиваемым на заготовку.

2.3. Механическая обработка концов труб

Процесс подготовки конца трубы для выполнения следующей операции заключается в удалении заусенцев и обработке кромки трубы после обрезки. В зависимости от последующей операции обработка концов труб подразделяется:

- на подготовку торцов под последующие операции – торцовку;
- развальцовку;
- обжатие;

- зиговку, раскатку и дорнование;
- обработку торцов труб с технологическим припуском;
- обработку торцов труб под сварку и пайку.

2.3.1. Торцовка

При обработке торцов труб под развальцовку, зиговку, раскатку и дорнование обрез торца должен быть выполнен под прямым углом к оси и не иметь резких переходов, рисок и шероховатостей. Торцовку концов труб рекомендуется производить на специализированных станках типа СТТ-50 или на токарных станках.

Торцовка осуществляется инструментом, который подается на неподвижную трубу, закрепленную в специальном приспособлении. При торцовке труб на токарных станках зажим трубы осуществляется на суппорте станка, и труба подается на вращающийся инструмент, закрепленный на планшайбе.

В качестве инструмента для торцовки труб из алюминиевых, титановых сплавов и нержавеющей сталей используют специальные зенкеры, торцовые фрезы, а также специальные резцы, установленные в резцедержателе, смонтированном на торцовой головке. Пример специального резца приведен на рис. 2.3.

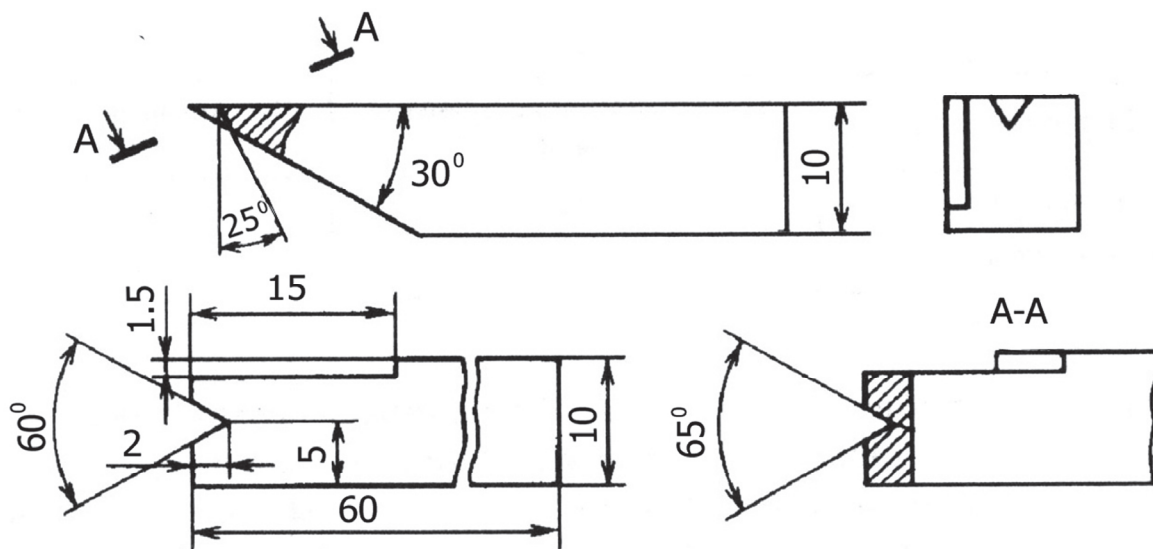


Рис. 2.3. Специальный резец для торцовочной головки

Оптимальные режимы торцовки труб на станке СТТ-50 представлены в табл. 2.2.

Для труб и патрубков диаметром свыше 28 мм торцовку и снятие заусенцев можно осуществлять вручную напильником. Для торцовки и скругления кромок трубы под развальцовку используют специальные торцовки или составные зенкера. Торцовку труб и патрубков под сварку, пай-

ку диаметром свыше 30 мм осуществляют на универсальной оправке, закрепленной на токарном станке или вручную в специальном упоре на рабочем месте, используя универсальный слесарный инструмент. Торцы труб под развальцовку, раскатку и зиговку должны быть выполнены под прямым углом к оси и не иметь резких переходов. Не допускаются трещины, заусенцы, риски и шероховатости.

Таблица 2.2

Оптимальные режимы торцовки труб

Материал	Скорость подачи инструмента, мм/об	Число оборотов шпинделя, об/мин
Алюминиевые сплавы	0,127	620
Нержавеющие стали	0,127	400
Титановые сплавы	0,127	180 – 200

Величина радиуса скругления кромки под развальцовку, зиговку и раскатку должна быть в пределах 0,2...0,5 от толщины стенки трубы S . Вместо радиуса скругления кромки допускается фаска размером 0,2 S ...0,3 S в зависимости от толщины стенки трубы. Шероховатость торца трубы не должна быть ниже Rz_{40} для труб из алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей и $Rz_{2,0}$... $Rz_{2,5}$ для труб из титановых сплавов. Кромки труб и патрубков, подготовленные под сварку, должны быть без задиров, фасок, забоин, вмятин и заусенцев и не должны иметь завалов по торцам.

2.3.2. Развальцовка

Развальцовка – наиболее часто применяемая операция при изготовлении разъемных ниппельных соединений трубопроводов и гидравлических и масляных систем самолета. Процесс развальцовки концов труб состоит в получении конического или сферического раструба на конце трубы посредством приложения внешней сосредоточенной силы изнутри трубы вращающимся инструментом. Развальцовка осуществляется посредством сообщения инструменту движения двух видов:

- 1) поступательного под действием силы P ;
- 2) вращательного с моментом M .

Развальцовку труб диаметром до 20 мм с толщиной стенки до 1 мм можно производить вручную (рис. 2.4). Операция выполняется с помощью керн-оправки 1 или вальцовок 3 и 5 .

При развальцовке керном заготовка зажимается в тисках 4 с помощью разрезной матрицы 2 и формуется вручную ударами молотка по керну или с помощью пневматического молотка, в который вместо бойка-обжимки вставляется керн. При развальцовке вращением вальцовки вместо керна используется коническая 3 или сферическая 5 вальцовки.

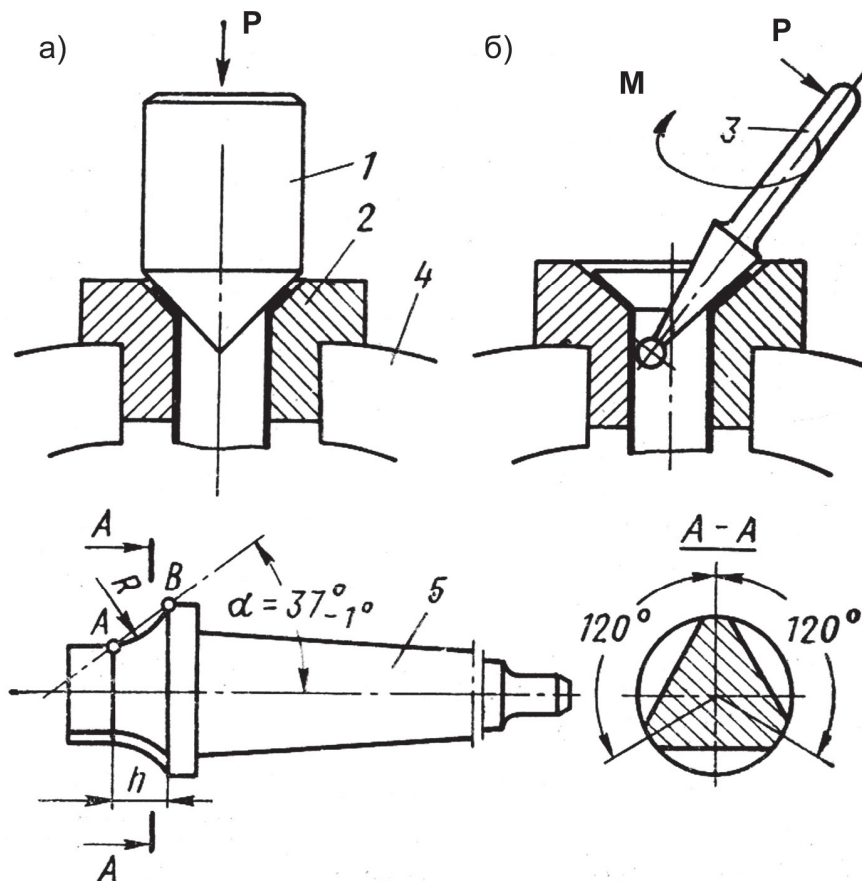


Рис. 2.4. Методы ручной развальцовки концов труб:
 а – развальцовка керном; б – развальцовка вращающейся вальцовкой;
 1 – керн-оправка; 2 – матрица; 3 – ручная коническая вальцовка;
 4 – тиски; 5 – сферическая вальцовка

Сферические вальцовки дают качество соединений значительно лучшее, чем вальцовки с конической рабочей поверхностью. При развальцовке описанными способами не получается правильная внутренняя конусная поверхность высокой чистоты, что особенно важно для ниппельных соединений, в которых герметичность создается без дополнительных уплотнений. Кроме того, указанные способы малопродуктивны.

Существуют и другие способы развальцовки:

- развальцовка многороликовыми оправками в ниппель;
- развальцовка однороликовым инструментом в неразъемное кольцо (матрицу).

Наиболее эффективен процесс развальцовки на трубовальцовочных станках (ТР). Сущность процесса машинной развальцовки заключается в том, что конический раструб на конце заготовки 3 (рис. 2.5) формируется сосредоточенной силой, действующей по линии соприкосновения роликов 5 с заготовкой 3, опирающейся на ниппель 2. Инструменту сообщается два

движения: поступательное, под действием силы P , создающей удельное давление q вращающимися вокруг собственной оси роликами 5, и вращательное, под действием крутящего момента M . Местные удельные давления действуют на малых участках, в местах соприкосновения участка трубы 3 с роликами 5. Поэтому небольшое усилие P вызывает значительные удельные давления q , что создает зоны пластической деформации 4 материала трубы.

При вращении оправки зона пластической деформации распространяется по всей окружности раструба, и диаметр трубы увеличивается. При этом происходит уменьшение исходной толщины стенки трубы S_0 до S_1 . Толщину стенки на краю развальцовки можно рассчитать по формуле

$$S_1 = S_0 D_0 / D_1,$$

где S_1 – толщина стенки в торце раструба; S_0 – толщина стенки в цилиндрической части; D_0 – наружный диаметр до развальцовки; D_1 – наружный диаметр трубы после развальцовки.

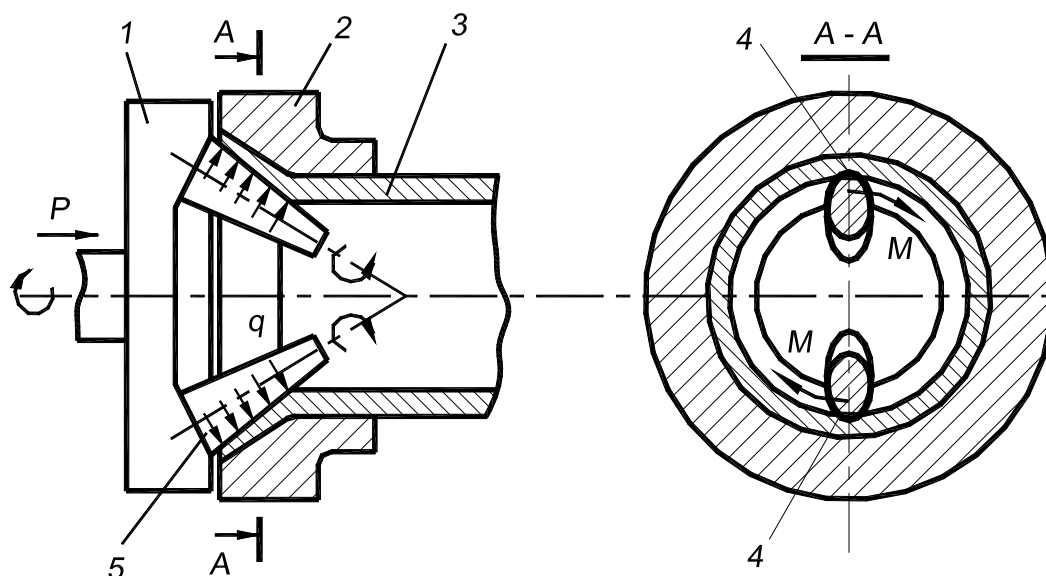


Рис. 2.5. Схема развальцовки на станке ТР-1:

- 1 – вращающаяся оправка; 2 – ниппель; 3 – труба (заготовка);
4 – зона местной пластической деформации; 5 – ролики

Вальцовка 1 крепится на шпинделе станка, вращающемся с частотой 75...300 об/мин. Заготовка собираемого соединения (труба с надетым на нее ниппелем) зажимается в губках самоцентрирующего зажимного устройства станка. Осевая подача инструмента осуществляется гидроцилиндром. Эта подача прекращается, когда осевое усилие достигает величины, устанавливаемой при настройке станка. После этого шпиндель автоматически возвращается в исходное положение. Зажатие детали механизировано и осуществляется с помощью специального зажима с гидроприводом.

Труборазвальцовочный станок (ТР-1) позволяет развальцовывать трубы диаметром от 4 до 50 мм при толщине стенки от 0,5 до 2 мм. Максимальное усилие, развиваемое гидроцилиндром подачи вальцовки, – 1000 кгс. Развальцовка труб из титана ведется с подогревом. Подогрев осуществляется в течение 30 с контактированием заготовки с зажимными губками, нагреваемыми до 300...450 °С от вмонтированных в них электронагревательных элементов. Последующая операция развальцовки занимает несколько секунд.

Обработка концов труб многороликовыми оправками с принудительным вращением рабочих роликов обеспечивает получение более качественного раструба. В табл. 2.3 приведены основные характеристики многороликовых оправок.

Таблица 2.3

Основные характеристики многороликовых оправок

Число рабочих роликов в оправке, шт.	Диапазон диаметров труб, мм	Применяемое оборудование	Наличие принудительного привода рабочих роликов
3	4...10	ТР1-3М; станок токарно-винторезный	Отсутствует
5	10...38	То же	То же
6	4...30	"-"	Имеется
6	4...38	Станок токарно-винторезный	То же

При изготовлении оправок должны быть выполнены следующие дополнительные требования:

- радиальное биение конусов рабочих роликов относительно оси вращения оправки должно быть не более 0,05 мм;
- от вращения одного рабочего ролика должны вращаться остальные без заеданий;
- касание рабочих роликов и среднего конуса должно быть не менее 80 % длины образующей;
- угол между рабочими поверхностями роликов и осью оправки должен быть $(37^{+15})^\circ$;
- образующие конусов рабочих роликов не должны иметь бочкообразности, допускается вогнутость на длине конуса не более 0,025 мм.

В оправках с принудительным приводом рабочих роликов

$$\beta = 2 \arctg \left(\frac{0,6 \sin(180/n)}{1 + 0,8 \sin(180/n)} \right),$$

где β – угол конуса рабочего ролика, град; n – число рабочих роликов, шт.

Тогда угол конуса рабочего ролика

$$\gamma = 74^\circ - 2\beta.$$

Во избежание налипания на рабочие корпуса металлической пыли и мелкой стружки рекомендуется отдельные детали или оправки в сборе периодически размагничивать.

Осевое усилие P , необходимое для развальцовки концов труб много-роликным инструментом «на воздухе», в ниппель или матрицу, определяется по формуле

$$P = 0,4nS_0\sigma_b\sqrt{D_1S_0}, \quad (2.1)$$

где n – число рабочих роликов; S_0 – исходная толщина заготовки, мм; σ_b – предел прочности материала, МПа; D_1 – диаметр раструба, мм.

Усилие зажима, необходимое для удержания трубы от выползания при формообразовании «на воздухе» и в ниппель, определяется по следующей формуле:

$$N = (1,0...1,4) P,$$

если зажимные вкладыши имеют гладкую рабочую поверхность, при этом P определяется по формуле (2.1).

Рекомендуемые режимы ведения механизированного процесса получения конусного раструба формообразованием концов труб многороликовым инструментом представлены в табл. 2.4. Знак "+" означает оптимальное значение осевой подачи.

Таблица 2.4

Рекомендуемые режимы ведения процесса получения конусного раструба

Материал	Наружный диаметр трубы, мм	Толщина стенки трубы, мм	Частота вращения шпинделя, об/мин			
			300...350		500...550	
			осевая подача, об/мин			
			0,24	0,36	0,17	0,24
Сталь 12Х18Н10Т	4 – 6	0,5 – 0,8	+		+	
АМг2М	6 – 24	1,0		+	+	+
Другой алюминиевый сплав	25 – 38	1,0		+		

Для достижения максимальной точности радиуса сопряжения r и угловых размеров рекомендуется производить формообразование раструба за два перехода:

1) развальцовка концов труб роликовыми инструментами, рабочий угол которых $67...72^\circ$;

2) окончательное формообразование раструба коническим пуансоном в штампе.

Толщина стенки на краю торца трубы после развальцовки много-роликовыми оправками может быть определена по формуле

$$S_k = S_0 D_n / D_1,$$

где S_0 – исходная толщина заготовки, мм; D_n – наружный диаметр трубы, мм; D_1 – наружный диаметр конца раструба, мм.

Развальцовку рекомендуется применять для труб с наружным диаметром 3...38 мм, с толщиной стенки 0,5...1,5 мм. Допустимый коэффициент развальцовки не должен превышать 1,4. Для получения качественного раструба требуется правильная взаимная установка многороликовых оправок и зажимного механизма. Допускается взаимное смещение осей не более 0,02 мм.

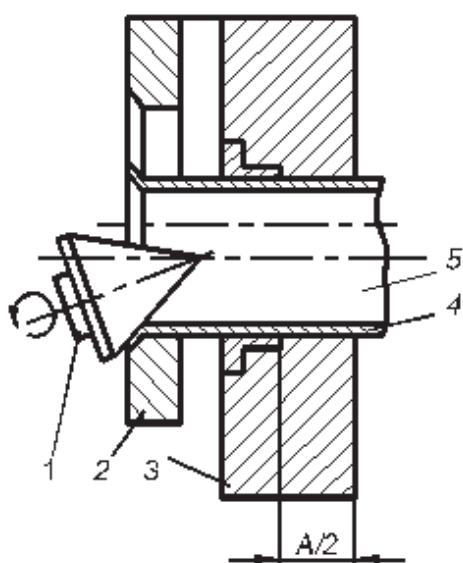


Рис. 2.6. Развальцовка концов труб однороликовым инструментом:

1 – формирующий ролик; 2 – неразъемное кольцо (матрица);
3 – зажим; 4 – ниппель;
5 – труба

- стабильность получения радиуса перехода из конической части в цилиндрическую на внешней поверхности трубы, а также угловых размеров конусной части раструба;

- обеспечение требуемой соосности между конической и цилиндрической частями трубы;

- отсутствие «зажима» металла на конической и цилиндрической частях трубы, имеющее место при развальцовке труб способами обжима полуматрицами;

Формообразование раструба конца трубы однороликовым инструментом осуществляется коническим роликом в неразъемное кольцо (матрицу) (рис. 2.6), вращающимся по периметру трубы и имеющим относительное поступательное осевое перемещение внутри трубы. При этом деформирование стенки трубы производится в заранее установленном зазоре между роликом и кольцевой матрицей, обеспечивающими таким образом одновременную раздачу и раскатку конца трубы.

В отличие от других способов развальцовки этот способ имеет следующие преимущества:

- незначительное осевое усилие;
- отсутствие напыла металла внутри трубы в зоне перехода конуса в цилиндр;

- отсутствие разнотолщинности и огранки внутреннего конуса при обработке разнотолщинной и имеющей внутреннюю огранку исходной заготовки;

- отсутствие потери устойчивости цилиндрической части труб с толщиной 0,6 мм и менее;

- обеспечение требуемой чистоты внутренней поверхности конуса раструба;

- не требуется доработка внутреннего конуса раструба с помощью притиров и подчеканки коническим пуансоном, зачистка и облагораживание поверхности шкурками.

Для развальцовки концов труб однорезным инструментом рекомендуется использовать токарный станок, например, универсальный токарный станок типа 1К62. Инструмент для развальцовки, состоящий из вращаемого ролика, корпуса и неразъемного кольца (матрицы), установленного через подшипники в корпусе, монтируется на станке, при этом вращательный ролик при помощи конуса Морзе устанавливается в шпинделе станка, а корпус жестко крепится на станине станка во избежание самопроизвольного вращения. Устройство для зажима труб монтируется на каретке суппорта. Жесткий упор устанавливается на управляющих станины. Инструмент для развальцовки и устройство для зажима обеспечивают обработку труб диаметром от 3 до 38 мм. Рекомендуемые режимы деформирования для труб из сталей:

- частота вращения шпинделя токарного станка – 300...600 об/мин;

- подача заготовки при механизированном перемещении суппорта – 0,15...0,60 мм/об;

- время выглаживания отформованного раструба трубы (без осевого перемещения заготовки) – 1...2 с.

Радиальное усилие Q , необходимое для развальцовки концов труб однорезным инструментом в неразъемное кольцо, определяется по следующей формуле:

$$Q = S_0 \sigma_s [1,4(D_1 - D_n) + 0,3\sqrt{D_1 S_0}].$$

Не рекомендуется осуществлять формообразование концов труб однорезным инструментом данной конструкции, если потребное радиальное усилие для их формообразования, рассчитанное по формуле (2.1), превышает 15 000 Н.

Сферическая развальцовка (рис. 2.7) осуществляется на том же оборудовании и на тех же режимах, что и обычная, специальным инструментом (роликовым раскатником). Рекомендуемая область применения: для труб из алюминиевых сплавов диаметром от 10 до 38 мм, для труб из коррозионно-стойкой стали диаметром от 14 до 38 мм.

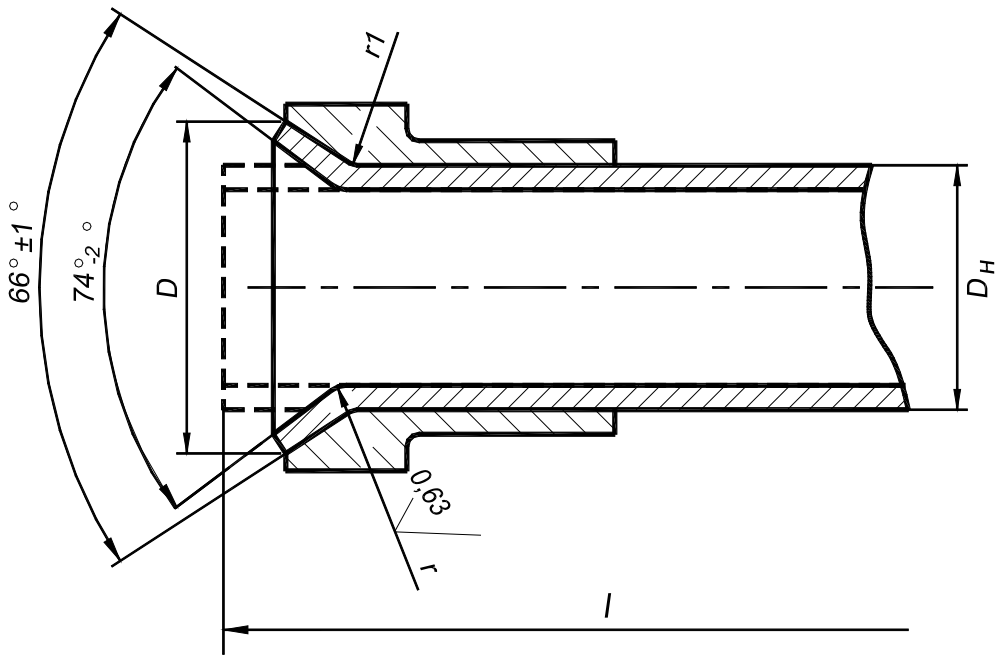


Рис. 2.7. Сферическая развальцовка

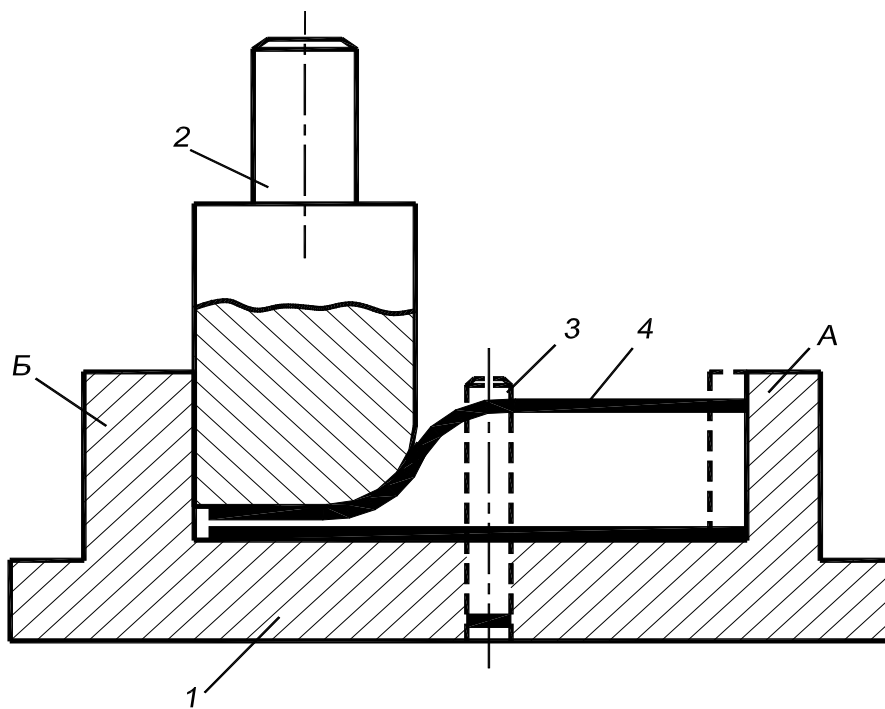


Рис. 2.8. Штамп для сплющивания:
1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – фиксатор; 4 – деталь

2.3.3. Сплющивание

При изготовлении из труб электромонтажных клеммных наконечников и при формовке концов стоек и раскосов каркаса самолета применяется сплющивание. Схема простейшего штампа для сплющивания конца трубы дана на рис. 2.8. Сплющиваемая деталь 4 фиксируется от перемещения в продольном направлении (под действием осевой составляющей усилия сплющивания) упором А, а пуансон 2 – упором Б. В поперечном направлении заготовка удерживается фиксаторами 3.

При штамповке электромонтажных наконечников обычно применяются комбинированные штампы, совмещающие операции сплющивания середины заготовки, общей для двух деталей, вырубку двух отверстий и вырубку вогнутой перемычки, образующей два скругленных торца обжатых концов наконечников. Таким образом, за один удар штампа получают два готовых наконечника.

3. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУБ

3.1. Гибка труб

Гибка труб является одной из основных операций технологического процесса изготовления трубопровода. При гибке труб путем деформирования прямой заготовки получают детали необходимой конфигурации. Наиболее важным для осуществления качественной гибки является правильный выбор метода гибки в зависимости от диаметра и толщины стенки трубы, материала, радиуса изгиба, числа изготовленных деталей, условий производства, типа оборудования, группы точности и предъявляемых требований к качеству изготовления деталей.

Гибка труб может выполняться вручную с приспособлениями или без них, на трубогибочных станках или в штампах. По характеру взаимодействия внешних силовых факторов, действующих в процессе деформирования на заготовку, различают следующие основные методы гибки трубы:

- в роликах по трех- или четырехроликовой схеме;
- обкаткой;
- намоткой.

3.1.1. Гибка вручную

Вручную по шаблонам гибки (ШГ) без нагрева и наполнителя гнется основная часть трубопроводов небольшого диаметра (4...8 мм). Шаблон гибки выполняется в виде стального прутка. Перед гибкой на заготовке мелом помечают границы изогнутых участков. Небольшие отклонения в размерах деталей могут быть легко компенсированы подгибом детали при сборке.

При больших диаметрах трубы гнут с наполнителем в виде песка, легкоплавких сплавов или гидронаполнителя. Заготовка, забитая снизу деревянной пробкой, устанавливается на вибрирующую площадку, засыпается из расположенного сверху бункера песком и забивается деревянной пробкой с верхнего конца. Песок позволяет гнуть трубы как в холодном, так и в горячем состоянии, но как наполнитель имеет ряд недостатков. При плотном заполнении труб частицы песка сцепляются с внутренней поверхностью трубы.

Это сцепление тем больше, чем мягче материал заготовки. Трудоемкая операция удаления частиц песка значительно удорожает и увеличивает длительность процесса. Заготовки должны иметь технологический припуск 50...70 мм, увеличивающий расходы металла. Остатки песка засоряют при эксплуатации гидросистемы самолета, вызывая отказы в работе. При заполнении песком возможно образование воздушных полостей, на месте которых при гибке стенки теряют устойчивость.

Гибкая оправка (рис. 3.1) представляет собой узел, собранный из шайб 1 с наружным рабочим пояском, скругленным по сфере, и сферических прокладок 2, нанизанных на тросик 3. Задний конец тросика проходит в отверстие оправки и натягивается сильной пружиной 4. В нерабочем состоянии под действием пружины вся оправка имеет прямолинейную форму. Шайбы и прокладки выполнены из закаленной стали. Для облегчения скольжения в трубе оправка покрывается слоем электролитической меди. При гибке с такой оправкой труб диаметром 38...112 мм с толщиной стенки 0,4...1,0 мм из нержавеющей стали и алюминиевых сплавов при радиусе кривизны $R \geq 2d/3$ гофра на поверхности детали не образуется.

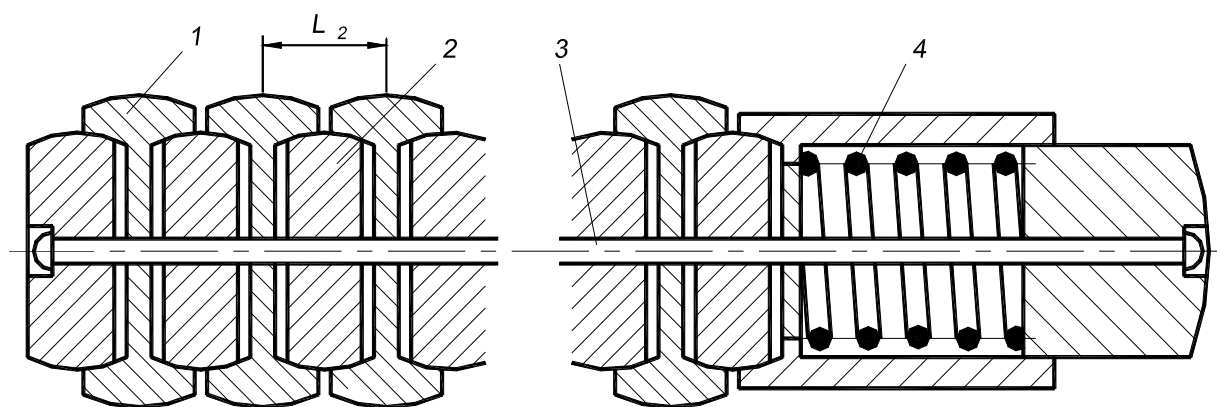


Рис. 3.1. Гибкая оправка

Гибка с оправками требует хорошей смазки оправок и внутренней поверхности трубы. Рабочие поверхности шариков и шайб, из которых собираются оправки, полируются. Гибка с внутренним гидронагружением

позволяет совместить изгиб с испытанием на прочность, исключает возможность попадания в деталь частиц сыпучего заполнителя (песка), металлических частиц от надиря стенок оправками и создает условия для автоматического управления режимами гидронагружения и гибки.

Сущность процесса гибки с внутренним гидронагружением заключается в том, что заготовка 1 (рис. 3.2), закрытая с одной стороны заглушкой 3 и подсоединенная другим концом к гидростенду, заполняется жидкостью под давлением и гнется в трубогибочном приспособлении или станке 2 с сохранением постоянного внутреннего давления до конца гибки. Давление жидкости предохраняет изгибаемые сечения от образования гофров и овальности.

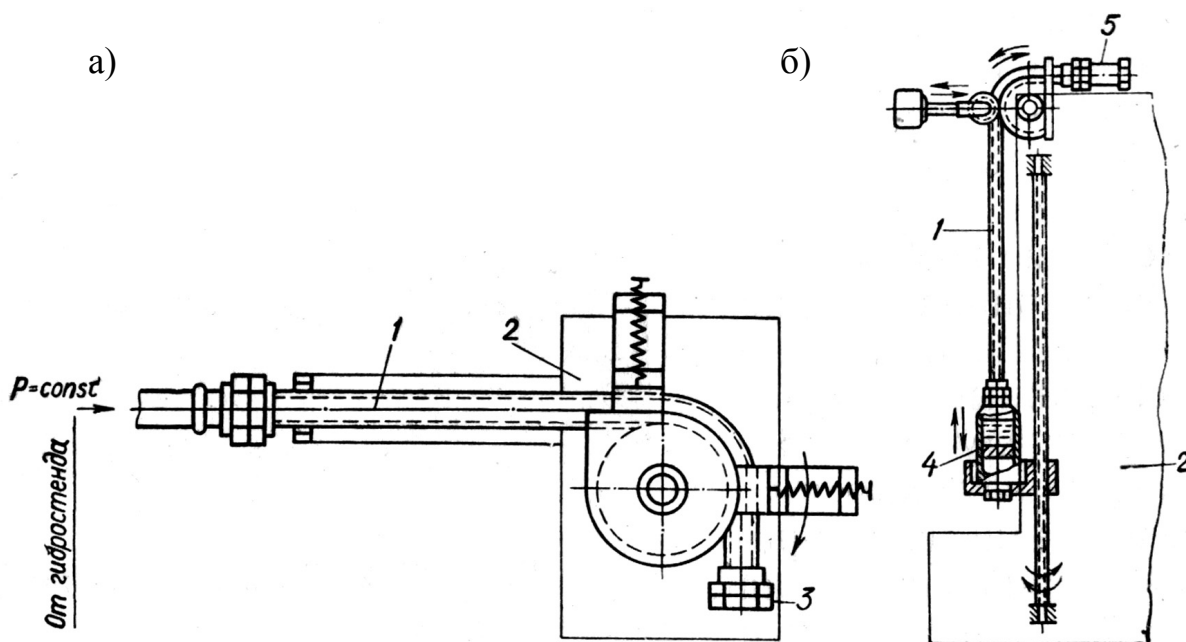


Рис. 3.2. Схема гибки с гидронагружением:

а – с постоянным давлением от гидростенда; б – с падением гидростатического давления от гидроаккумулятора;

1 – заготовка; 2 – станок; 3 – заглушка; 4 – гидроаккумулятор;

5 – обратный клапан

С внутренним гидронагружением можно гнуть как тонкостенные, так и толстостенные трубы при радиусе изгиба. При недостаточном давлении гидрозаполнителя на деформируемых участках заготовки образуются складки (гофры) и овальность. При чрезмерном повышении давления гидрозаполнителя заготовка раздувается. Оптимальная величина давления находится между началом потери устойчивости и началом раздутия, и в производственных условиях берется из таблиц.

3.1.2. Гибка в ручных трубогибочных приспособлениях

Ручные приспособления применяют при гибке труб из алюминиевого сплава АМцМ диаметром до 20 мм, а из дуралюмина Д16, сталей 20А и 1Х18Н9-Т – диаметром до 12 мм. При этом можно получать минимальные радиусы изгиба, равные трем диаметрам трубы. В приспособлениях осуществляется гибка труб без наполнителя и с наполнителем.

На рис. 3.3 показано ручное приспособление, применяемое для гибки сложных деталей, имеющих изгибы в нескольких плоскостях. На таких приспособлениях гнутся трубы диаметром до 12 мм. Приспособление смонтировано на балинитовой плите 1 и состоит из фиксирующих колодок 2, опорных планок 3, контрольных планок 5, неподвижно закрепленных на плите, и съемной универсальной гибочной оправки, переставляемой по ходу гибки последовательно в отверстия опорных планок 3. Оправка состоит из диска 7, оси 4, рукоятки 8 и прижима 10, прижимаемого к диску 7 винтом 11 через палец 9.

Гибка в приспособлении выполняется в следующем порядке: конец трубы-заготовки 13 вставляется в паз колодки 2, продвигается до упора 12 и фиксируется прихватом 6. Затем на планку 3 устанавливается гибочная оправка. Ось 4 оправки вставляется в центральное отверстие планки 3, а сама планка 3, входя своими боковыми гранями в паз, имеющийся на нижнем торце диска 7, фиксирует его от проворачивания. Прижим 10 вставляется между заготовкой 13 и пальцем 9. Вращением винта 11 он прижимается к заготовке.

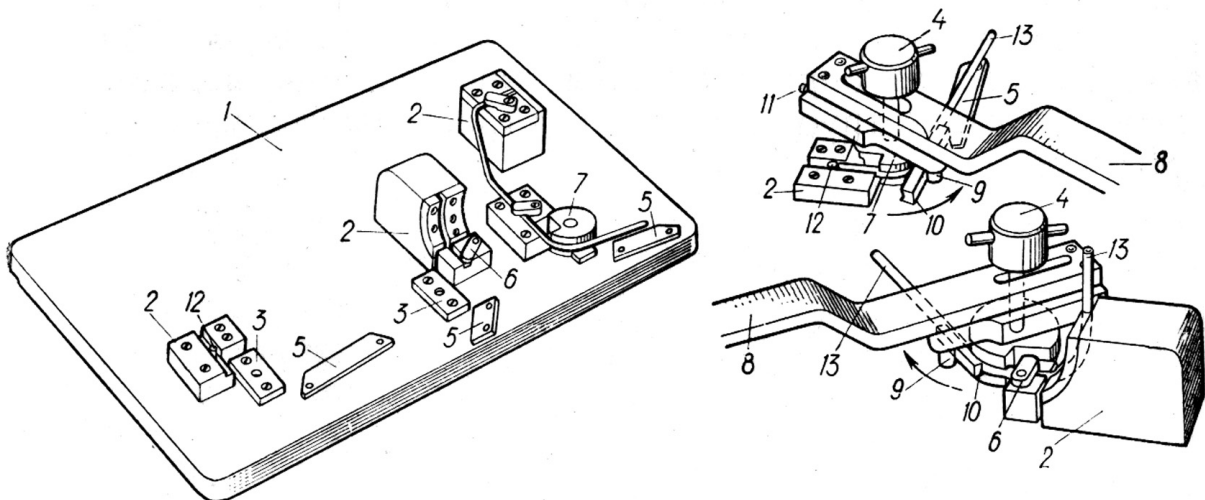


Рис. 3.3. Приспособление для гибки в нескольких плоскостях:
1 – плита; 2 – фиксирующая колодка; 3 – опорная планка; 4 – ось;
5 – контрольная планка; 6 – прихват; 7 – диск; 8 – рукоятка;
9 – палец; 10 – прижим; 11 – винт; 12 – упор; 13 – заготовка

Вращением рукоятки 8 заготовка гнется до упора в контрольную планку 5. При установке гибочной оправки на другие опорные планки 3 операция повторяется в аналогичном порядке.

В серийном и опытном производствах широко применяется изгиб труб с местным нагревом заготовки пламенем газовой горелки. Так гнутся трубы без наполнителя и с наполнителем. Нагрев используется при этом и как способ управления процессом, так как, смещая область нагрева, можно изменять положение изгибаемого участка заготовки.

При нагреве труб из алюминиевых сплавов поддерживают температуру деформируемого участка, примерно равную температуре отжига данного сплава. Контроль температуры ведут с помощью термокарандаша. Стальные трубы нагревают докрасна. Образовавшиеся неглубокие гофры правят полукруглой обжимкой, подогревая горелкой место правки. Но при ручном нагреве пламенем горелки возможны пережоги материала и низкое качество поверхности детали.

Процесс гибки труб сопровождается утонением стенки трубы, отклонением от округлости поперечного сечения, гофрообразованием стенки, пружинением трубы. В процессе гибки под действием изгибающего момента на наружной части согнутого участка трубы возникают растягивающие, а на внутренней – сжимающие напряжения.

При малых диаметрах труб целесообразна гибка вручную. Физические усилия, необходимые для гибки, очень малы и затраты времени на установку заготовки на станок и управление станком ничем не оправдываются, так как производительность при ручной гибке труб малых диаметров значительно выше, чем на станках.

При диаметрах больше 10...15 мм усилия гибки и затраты физического труда при ручном выполнении операции настолько велики, что операцию переводят на станки даже в мелкосерийном производстве.

Применяются следующие способы гибки на станочном и штамповом оборудовании:

- пооперационная на трубогибочных станках без ПУ;
- механизированная на трубогибочных станках с ПУ;
- в инструментальных штампах и в специальной оснастке на гидравлических прессах.

3.1.3. Гибка на трубогибочных станках

Схема гибки на распространенной конструкции трубогибочного станка ТГС-2 показана на рис. 3.4. Гибочная оправка 1 крепится на вращающемся столе станка. На этом же столе поворачивается вместе с оправкой прижим 6, прижимающий конец трубы 4 к оправке 1. Калибрующая оправка 2 с тягой 3 крепится неподвижно на стойке станка. Трубу 4 надевают на калибрующую оправку 2 до упора, устанавливаемого на заданный

размер. Конец трубы поворотным прижимом 6 прижимают к гибочной оправке 1. Подводят к трубе плавающий прижим 5, который может перемещаться вдоль оси трубы. При повороте стола станка оправка 1 начинает изгибать трубу; прямой участок трубы, перемещаясь влево, увлекает силой трения плавающий прижим 5.

Таким образом, деформируемый участок трубы оказывается зажатым по наружному диаметру между желобками оправки 1 и плавающего прижима 5, а по внутреннему диаметру – калибрующей оправкой 2. Это предохраняет трубу от искажения поперечного сечения и от образования гофров на внутренней части трубы.

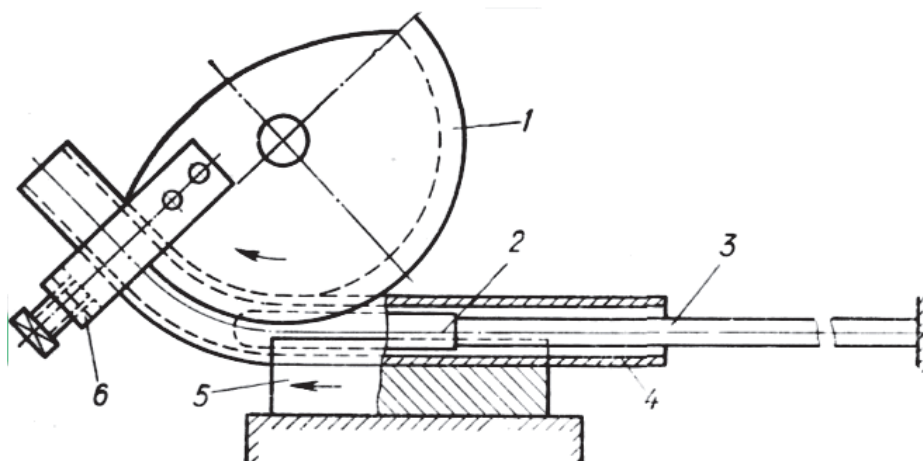


Рис. 3.4. Гибка на станке ТГС-2:

1 – гибочная оправка; 2 – калибрующая оправка; 3 – тяга;
4 – труба; 5 – плавающий прижим; 6 – поворотный прижим

На станке ТГС-2 можно гнуть трубы с наружным диаметром до 80 мм. Гидромотор привода шпинделя позволяет бесступенчато регулировать число оборотов шпинделя от 0 до 2,8 об/мин. Недостаток станков типа ТГС-2 – необходимость изготовления оснастки для каждого диаметра трубы и радиуса ее изгиба и необходимость переустановки заготовки при гибке в нескольких плоскостях.

На самолетостроительных заводах эксплуатируются также трубогибочные программные автоматы с магазинами, вмещающими до 30 заготовок диаметром до 50 мм и длиной до 3600 мм. Эти автоматы имеют числовое программное автоматическое ручное управление. Предпочтение отдается станкам с ЧПУ модели ТГСП, обладающим высокими точностью и производительностью. Трубогибочные станки с ЧПУ модели ТГСП предназначены для гибки труб из сталей, алюминиевых и титановых сплавов с использованием жестких дорнов, легкоплавких и сыпучих наполнителей. Основные технические характеристики трубогибочных станков модели ТГСП приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Технические характеристики трубогибочных станков

Показатель	Модель станка			
	ТГСП-24	ТГСП-40	ТГСП-80	ТГСП-120
Диаметр трубы, мм:				
- наименьший	6	18	40	40
- наибольший	24	40	80	120
Радиус гiba, мм:	$\geq 2D_{н}$	$\geq 2D_{н}$	$\geq 2D_{н}$	$\geq 2D_{н}$
- наименьший	20	27	60	90
- наибольший	150	250	400	600
Наибольший угол гiba, град	200	200	200	200
Габаритные размеры, м	3,81×2,66×1,52	4,07×1,2×1,68	6,8×3,09×2,07	7,14×3,09×2,07

Станки модели ТГСП с ЧПУ работают в следующих режимах: наладочном от кнопок пульта управления; полуавтоматическом (прерывистом) по заданной программе; автоматическом по заданной программе.

Гибка труб на станках производится методом намотки на поворотный шаблон (рис. 3.5). Гибочный шаблон определяет радиус изгибаемых участков трубы. Прямолинейный участок шаблона совместно с зажимом 8 обеспечивает захват заготовки. Прижимная матрица 4, установленная на подвижном ползуне 10, при вращении шаблона 6 создает в трубной заготовке 7 изгибающий момент и под действием сил трения перемещается вместе с изгибаемой трубой 7, установленной на дорне 9.

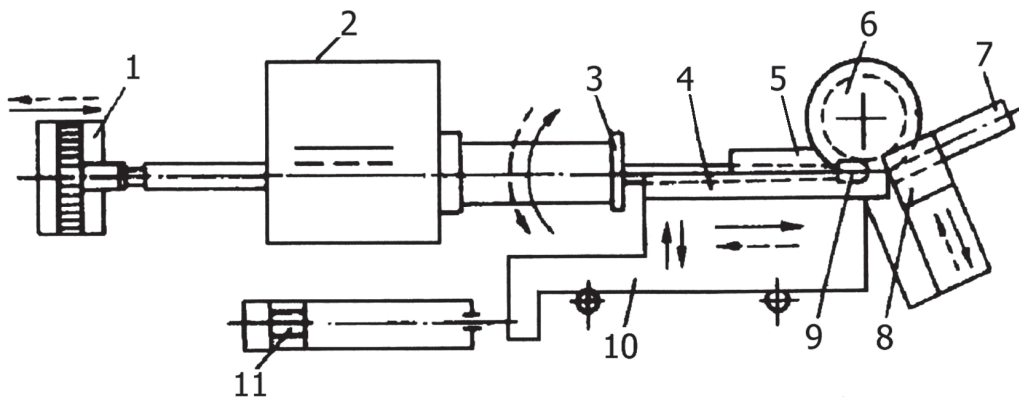


Рис. 3.5. Основные узлы станков модели ТГСП:

- 1 – съемник дорна; 2 – механизм подачи и поворота заготовки;
 3 – цанговый патрон; 4 – прижимная матрица; 5 – разглаживающий башмак; 6 – гибочный шаблон; 7 – труба; 8 – зажим; 9 – дорн;
 10 – подвижный ползун; 11 – бустерный цилиндр

Для снижения растягивающих напряжений и уменьшения утонения стенки по наружному радиусу трубы подвижному ползуну 10 с прижимной матрицей 4 сообщается дополнительное усилие от бустерного цилиндра 11. Усилие, передаваясь на деформируемую трубу, разгружает стенку трубы в зоне растяжения, что приводит к меньшему утонению стенки трубы при гибке с минимально критическими радиусами.

Разглаживающий башмак 5, расположенный в зоне деформации между прижимной матрицей 4 и гибочным шаблоном 6, препятствует образованию гофров со стороны внутренней образующей изгибаемой трубы 7. Обеспечение длины прямых участков трубы и углов между плоскостямигиба осуществляется с помощью механизма 2 продольной подачи и поворота заготовки с цанговым патроном 3. Съёмник дорна 1 предназначен для удержания дорна 9 в фиксируемом положении при гибке трубы, извлечения инструмента из зоны деформирования по окончании процесса и возврата его в исходное рабочее положение. Другая функция съёмника заключается в том, чтобы при гибке сверхтонкостенных труб обеспечивать введение в трубную заготовку инструмента при нулевом зазоре между ними.

Гибка труб производится в автоматическом цикле. Угол поворота гибочного шаблона, величина подачи заготовки, угол поворота заготовки вокруг оси программируются с помощью системы ЧПУ. Автоматический цикл обеспечивается системой ЧПУ и средствами автоматики электрооборудования и гидрооборудования.

В качестве носителя информации при подготовке рабочих программ используются эталон и изготовленное по нему специальное приспособление. Наложением эталона на изготавливаемую деталь добиваются их полного совпадения по конфигурации путем включения или выключения соответствующих рабочих органов станка в наладочном режиме.

Каждое законченное перемещение (угловое или линейное) рабочих органов станка оценивается численно по индикации системы ЧПУ и записывается в виде программы. Рабочая программа может быть также составлена по числовым данным чертежа детали или координатам, снятым с эталона на универсальных измерительных машинах.

В комплект рабочей технологической оснастки для гибки труб входят: гибочный шаблон, зажим, прижимная матрица, дорны, разглаживающий башмак, скоба и пробка (рис. 3.6). Гибочный шаблон 4 предназначен для деформирования трубной заготовки с заданным радиусом изгиба, определяемым размером рабочего профиля. Радиус гибочного шаблона должен быть равен радиусу изгиба детали, если допускается отклонение радиуса изгиба готовой детали в пределах пружинения. Материалом для изготовления могут служить высокоуглеродистые инструментальные стали для гибочных шаблонов с размером изгиба не более 300 мм и низкоугле-

родистые цементируемые стали для гибочных шаблонов с размером изгиба свыше 300 мм.

Зажим служит для удержания трубы на гибочной оправке в процессе гибки. Для гибки тонкостенных труб рабочая поверхность зажима после чистовой обработки в размер так же, как и ответная часть на гибочной оправке, закругляется пескоструйной обработкой. Для гибки особо тонкостенных труб закругление поверхности и применение наждачных шкур может не дать должного эффекта. В этом случае с целью предотвращения выползания трубы из зажима необходимо применять технологическую пробку 5. Для зажима труб со сверхтонкими стенками наряду с технологической пробкой необходимо использовать скобу 6. Прижимная матрица 1, предназначенная для удержания недеформированного конца трубы в рабочем ручье матрицы, определяется с учетом длины развертки изогнутого участка трубы плюс $2 \times D_n$. Материалом матрицы может служить сталь, не требующая специальной упрочняющей термообработки.

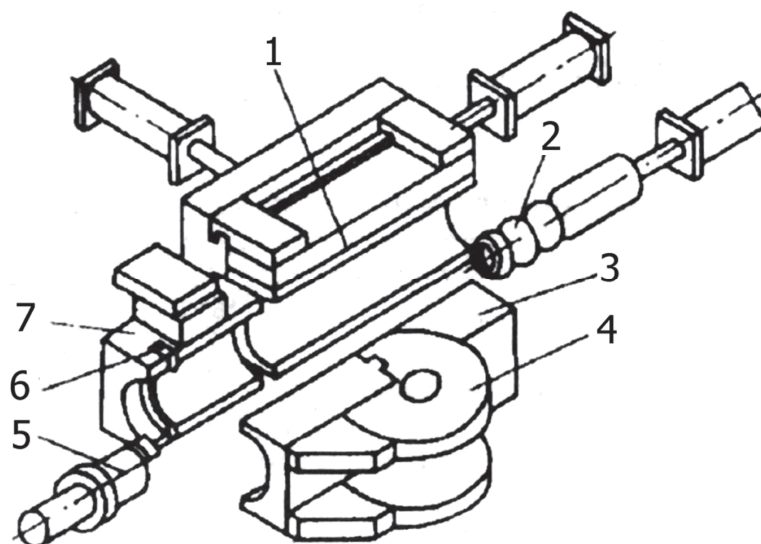


Рис. 3.6. Технологическая оснастка:

- 1 – прижимная матрица; 2 – дорн; 3 – разглаживающий башмак;
4 – гибочный шаблон; 5 – пробка; 6 – скоба; 7 – зажим

Для предотвращения гофрообразования в процессе деформирования трубы необходимы дорны, которые устанавливаются внутри трубы и через тягу крепятся к съемнику. Существуют различные по конструкции и технологическому применению дорны. Основными из них являются дорны-пробки, ложкаобразные дорны и многошаровые дорны (рис. 3.7). Дорны-пробки рекомендуется применять при гибке труб диаметром от 10 до 24 мм с радиусомгиба не менее $4,5 D_n$, ложкаобразные дорны – при гибке труб диаметром от 10 до 30 мм с радиусомгиба не менее $4,5 D_n$; многошаровые дорны – при гибке труб диаметром до 32 мм с радиусомгиба не менее $1,5 D_n$.

Дорны работают при больших значениях местных контактных напряжений, поэтому при некачественном изготовлении возможны наволакивания материала и задиры внутренней поверхности заготовки трубы. Для гибки труб из обычных сталей, алюминиевых и титановых сплавов рекомендуется применять дорны, изготовленные из инструментальной стали и термообработанные до HRC 60...65. Возможно хромирование дорнов с толщиной покрытия от 0,008 до 0,01 мм.

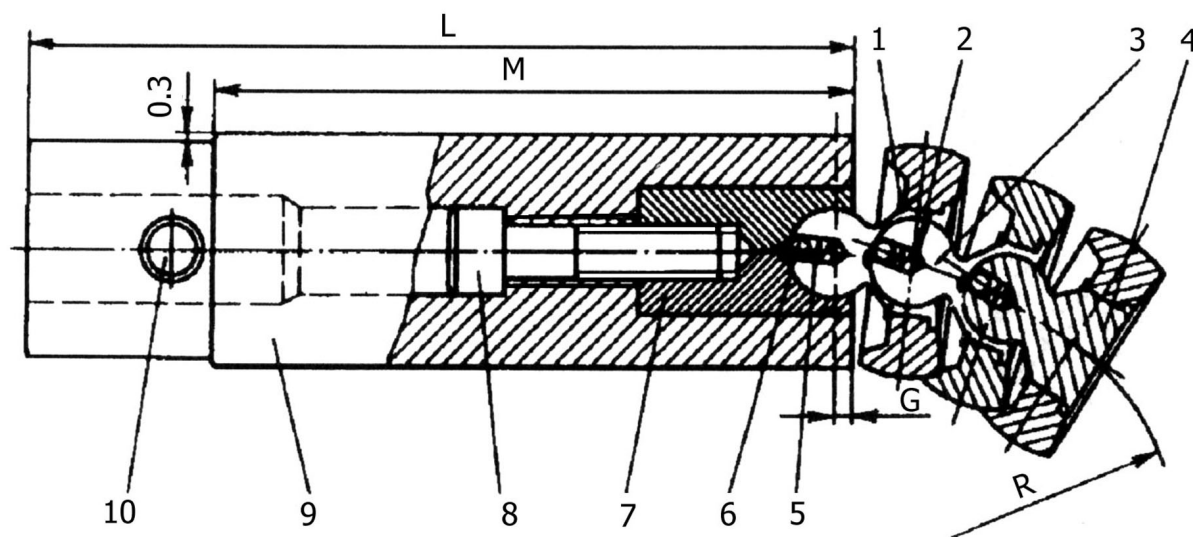


Рис. 3.7. Многошаровый дорн:

- 1 – стопорное кольцо; 2 – шар рабочий; 3 – соединительное гнездо типа «шар-гнездо»; 4 – концевая заглушка; 5 – пружина фиксатора; 6 – шарик (фиксатор); 7 – начальное звено; 8 – болт; 9 – цилиндрическая часть дорна; 10 – штифт

Дорны, изготовленные из низкоуглеродистых сталей, рекомендуется цементировать или азотировать. Для гибки труб из коррозионно-стойких сталей рекомендуется применять дорны, изготовленные из износостойких марок алюминиевых бронз. Поверхность дорнов необходимо полировать. При гибке труб из алюминиевых сплавов можно использовать дорн-пробку в виде оправки со сферическим концом из слоистого древесного пластика.

Точность изготовления комплекта оснастки определяется с учетом допустимого технологического зазора между заготовкой и сопрягаемыми с ней элементами оснастки. Оснастка может быть изготовлена из неметаллических материалов: дельта-древеси́ны, стеклотекстолита и др. Такую оснастку рекомендуется применять для деформирования труб из алюминиевых сплавов с повышенными требованиями к поверхностям детали.

3.1.4. Гибка в штампах

При длине детали, не превышающей 500...700 мм, и при достаточно больших сериях изделий гибку целесообразно вести в штампах. Операция выполняется как с заполнителем, так и без заполнителя. В штампах можно получать детали знакопеременной кривизны, изогнутые в одной плоскости, и детали с пространственной кривизной.

Гибка труб в штампах – наиболее производительный способ из всех рассмотренных раньше. Однако процесс имеет существенные недостатки, ограничивающие его применение, в частности: искажения сечения (смятие) трубы в местах начального ее контакта с пуансоном и матрицей; невозможность гибки в двух и более плоскостях на одном штампе; сложность доработки штампа на величину пружинения.

Гибку труб с толщиной стенки менее 1,0...1,5 мм рекомендуется выполнять на гидравлических прессах. При этом стенки сминаются меньше, чем при гибке на быстрходных кривошипных прессах. Конструкция простого штампа для гибки труб показана на рис. 3.8. Диаметр ручья штампа меньше наружного диаметра трубы на 0,3...0,4 мм. Материалом для изготовления пуансона 1 и матрицы 4 могут служить сталь, сплав АЦ13, цинк или дельта-древесина.

В конце хода деталь калибруется по поперечным сечениям жестким ударом. Для уменьшения трения и смятия детали штампы для гибки труб снабжаются на участках наиболее интенсивного изгиба роликами или поворотными деталями пуансона или матрицы, поворачивающимися при гибке вместе с соответствующими участками детали (рис. 3.9).

Из сопоставления левой и правой половин схемы можно проследить перемещение деталей штампа в процессе гибки.

В исходном положении сухари 1 матрицы находятся в горизонтальном положении под действием возвратных пружин 4. Горизонтальное положение сухарей фиксируется упорами 5. Труба 2 укладывается в ручьи, профрезерованные в сухарях.

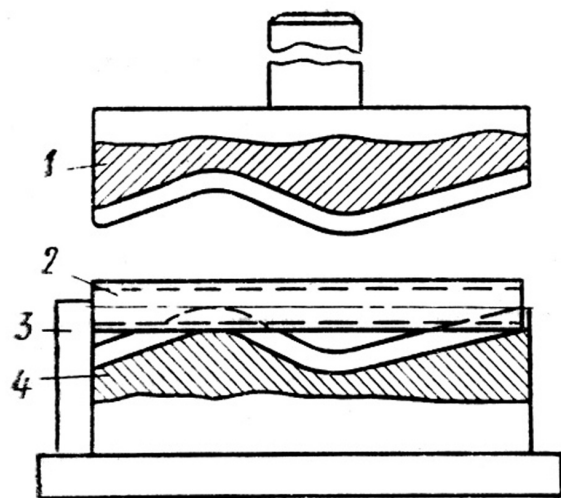


Рис. 3.8. Штамп для гибки трубы:
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – упор;
4 – матрица

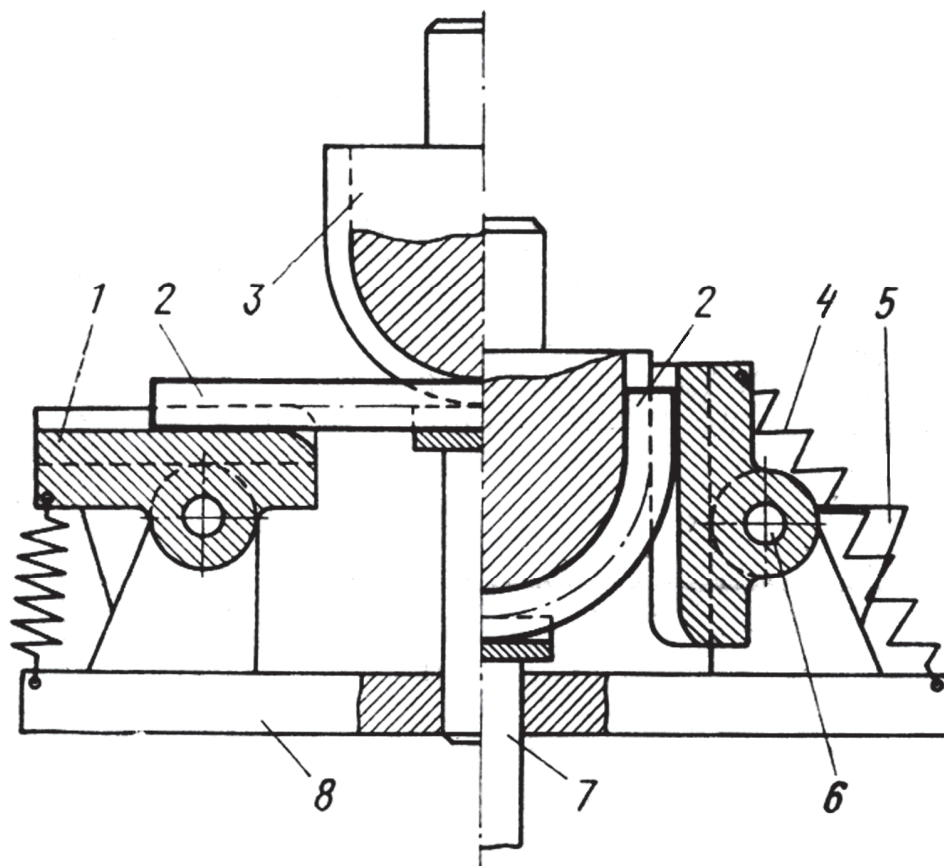


Рис. 3.9. Трубогибочный штамп с поворотными сухарями:
 1 – качающиеся сухари; 2 – заготовка (труба); 3 – пуансон;
 4 – возвратная пружина; 5 – упор; 6 – ось матрицы; 7 – прижим-
 выталкиватель; 8 – корпус матрицы

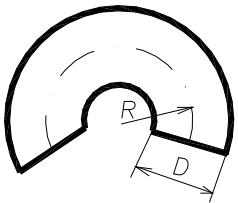
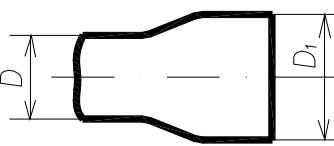
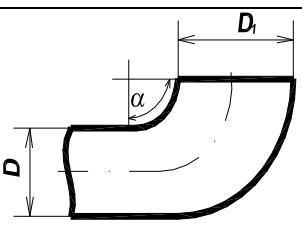
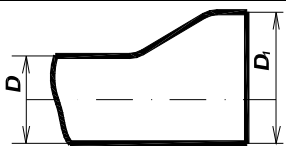
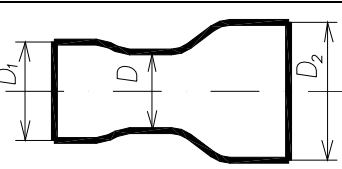
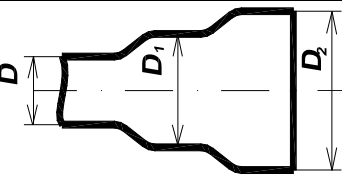
Средняя часть трубы опирается на прижим-выталкиватель 7. При ходе пуансона 3 вниз труба изгибается, и щеки, поворачиваясь, обкатывают трубу вокруг пуансона, что уменьшает смятие трубы. При ходе пуансона вверх выталкиватель 7 поднимает трубу 2, а пружины 4 возвращают сухари 1 в исходное положение.

3.2. Формообразование элементов трубопроводов

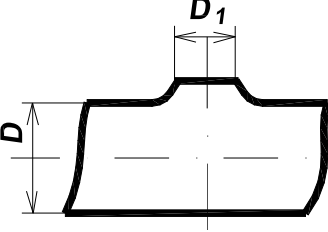
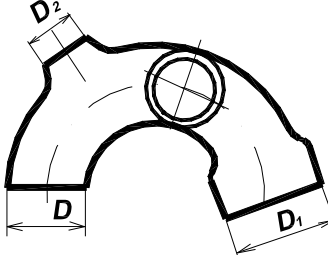
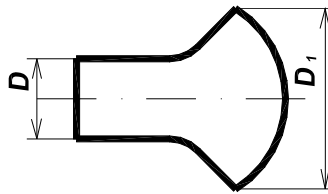
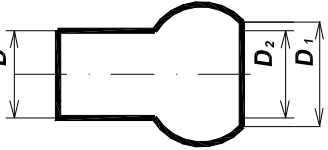
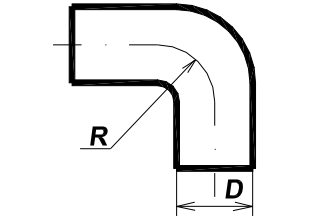
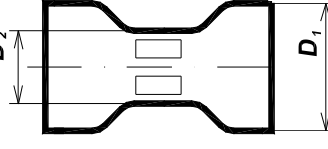
Широкое применение в конструкциях трубопроводов находят трубные детали с раструбом, фланцем на концах либо тороидальной законцовкой, ступенчатые детали, различные переходники и др. Наиболее распространенные детали такого типа приведены в табл. 3.1.

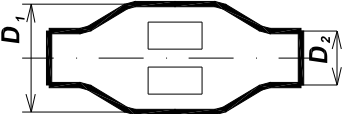
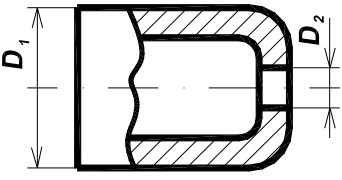
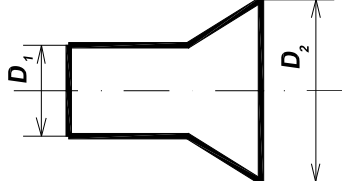
Таблица 3.1

Типовые элементы трубопроводов и способы их изготовления

Тип	Элемент	Название	Характеристика детали	Технология изготовления
1	2	3	4	5
I		Круто-изогнутый патрубок	$D = 20...100$ мм $R = (0,5...2,5)D$	Гибка-раздача по рогообразному сердечнику с нагревом
II		Переходник	$D = 10...100$ мм $D/D_1 \leq 2$	Раздача по жесткому пуансону с нагревом
III		Круто-изогнутый переходник	$D = 10...100$ мм $D/D_1 \leq 2$ $\alpha \leq 90^0$	Раздача по рогообразному сердечнику с нагревом
IV		Асимметричный переходник	$D = 10...100$ мм $D_1/D \leq 2$	Раздача по конусообразному жесткому пуансону с последующей калибровкой с нагревом
V		Переходник	$D = 10...100$ мм $D_1/D \leq 1,3$ $D_2/D \leq 2$	Двухсторонняя раздача по жесткому конусообразному пуансону с последующим нагревом большого диаметра
VI		Ступенчатый переходник	$D = 10...100$ мм $D_1/D \leq 1,3$ $D_2/D \leq 2$	Холодная раздача по жесткому пуансону с последующей раздачей с нагревом

Продолжение табл. 3.1

1	2	3	4	5
VII		Тройник	$D = 20...100$ мм $D_1 \leq D$	Отбортовка фланца в стенке трубы с нагревом
VIII		Фитинг	$D_1 = 20...100$ мм $D_1/D \leq 1,1$ $D_2 \leq D$	Гибка-раздача по рогаобразному сердечнику с последующей раздачей и отбортовкой фланца с нагревом
IX		Фланец	$D_1 = 15...70$ мм $D_1/D \leq 1,8$	Раздача с нагревом по жесткому пуансону
X		Законцовка	$D_1 = 15...70$ мм $D_2/D \leq 1,8$	Раздача посредством эластичной среды по жесткой матрице
XI		Патрубок	$D = 20...100$ мм $R = (0,5...2,5)D$	Гибка выталкиванием в фильеру
XII		Кожух	$D_1 = 20...100$ мм $D_1/D_2 \leq 1,3$	Обжим эластичной средой с последующей пробивкой отверстий полиуретаном

1	2	3	4	5
XII I		Муфта	$D_2/D_1 \leq 1,3$	Раздача эластичной средой с последующей пробивкой отверстий полиуретаном
XI V		Законцовка	$D_1 = 6...34 \text{ мм}$ $D_1/D_2 \leq 1,8$	Завальцовка в жесткой матрице
XV		Законцовка	$D_1 = 6...100 \text{ мм}$ $D_2/D_1 \leq 1,3$	Развальцовка по жесткому пуансону

Для получения деталей вышеуказанной формы применяются технологические процессы обжима или раздачи.

Под обжимом понимают уменьшение размеров поперечного сечения части полой заготовки путем одновременного воздействия инструмента по всему ее периметру. При раздаче размер поперечного сечения части полой заготовки увеличивается путем одновременного воздействия инструмента по всему ее периметру. В настоящее время операции обжима и раздачи выполняются в штампах при помощи жесткого или эластичного инструмента - пуансона и матрицы. Штамповка жестким инструментом подробно рассмотрена в работах [2 – 6]. При обжиме трубных заготовок применяются штампы, рабочий орган которых – матрица с рабочей плоскостью, имеющей прямолинейную, наклонную к оси симметрии или криволинейную образующую, в которую с усилием заталкивается заготовка и по мере продвижения принимает нужную форму.

Степень формоизменения при этом характеризуется коэффициентом обжима K , который определяется по формуле

$$K = D_0 / D,$$

где D_0 – начальный диаметр; D – диаметр деформированной части.

На практике реализуется несколько основных схем обжима в штампах:

а) ось заготовки расположена вертикально, усилие обжима приложено вдоль оси заготовки (рис. 3.10). Трубная заготовка 4 фиксируется в

штампе с помощью цилиндрического пояска, который делается или в матрице 2, или на плите 1. Под действием усилия P пресса производится обжим. Готовая деталь удаляется выталкивателем 3; регулируемый ход прессы дает возможность изменять длину обжатой части заготовки.

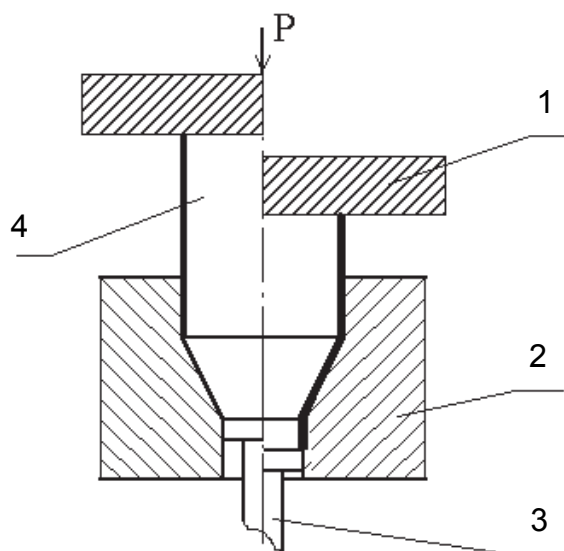


Рис. 3.10. Схема штампа для свободного обжима:

1 – плита; 2 – матрица; 3 – выталкиватель; 4 – заготовка

б) ось заготовки расположена горизонтально, усилие обжима приложено вдоль оси заготовки. Данная схема обжима обычно используется для изготовления деталей большой длины, из оборудования чаще всего применяются специальные станки-прессы, токарно-давилные или горизонтально-протяжные станки. На станине устанавливается с одной стороны гидравлический цилиндр, а с другой – кронштейн, на который крепится штамп для обжима. На штоке гидравлического цилиндра устанавливается направляющая втулка и опора для заготовки трубы, и через нее передается усилие обжима. С целью предотвращения потери

общей устойчивости трубы она на промежутке между опорой и штампом поддерживается несколькими люнетами. Опорный кронштейн может передвигаться ходовым винтом, положение его в каждом случае определяется длиной заготовки.

При раздаче трубных заготовок в штампах в качестве рабочего органа используется жесткий цельный пуансон, рабочая часть которого – коническая, выпуклая или вогнутая, с положительной или отрицательной кривизной образующей. Формоизменение заготовок оценивается коэффициентом раздачи K_p , который вычисляется по формуле

$$K_p = D_k / D,$$

где D_k – диаметр деформированной части; D – диаметр заготовки.

Существует несколько возможных схем процесса раздачи:

1) Ось заготовки расположена вертикально, деформирующее усилие приложено вдоль оси заготовки. В качестве рабочего инструмента используется жесткий пуансон или разжимная оправка. В зависимости от конструкции штампа усилие деформирования прикладывается либо к рабочему инструменту, который внедряется в трубную заготовку и пластически деформирует ее, либо к заготовке, которая в процессе раздачи наталкивается

на неподвижный пуансон. На рис. 3.11 показана схема раздачи, при которой пуансон остается неподвижным.

2) Ось заготовки расположена горизонтально, деформирующее усилие приложено вдоль оси заготовки. При таком варианте расположения заготовки можно подвергать раздаче трубы произвольной длины. Трубная заготовка располагается на столе прессы горизонтально и удерживается во время штамповки в зажимах трением, а пуансон получает горизонтальное перемещение.

Раздача может также производиться на различного вида приспособлениях, где конец заготовки закрепляется жестко, а инструмент получает вращение и движется поступательно, либо получает вращение заготовка, а осевая подача осуществляется инструментом. Такой способ раздачи называется развальцовкой.

Технологические возможности описанных выше способов обжима и раздачи жестким инструментом весьма ограничены. Они применяются обычно для изготовления деталей из алюминиевых сплавов и сталей и практически не используются для труднодеформируемых титановых сплавов, так как уже при изменении диаметра на 15...20 % возникает потеря устойчивости заготовки в осевом направлении, вследствие чего на недеформированной части трубы появляются гофры. При обжиге также возможно складкообразование на конической части из-за потери устойчивости в окружном направлении, причем высота складок увеличивается пропорционально увеличению деформации окружного сжатия. При раздаче вероятно появление шейки в одном или одновременно в нескольких участках кромки деформированной части заготовки, приводящей к разрушению – трещине.

Разновидностью обжима и раздачи в штампах является штамповка эластичным инструментом [7 – 11]. При штамповке эластичной средой в качестве рабочего инструмента до настоящего времени использовалась резина различных сортов с низкими механическими свойствами. В связи с бурным развитием химии появились синтетические материалы: адипрен, автотан, полиуретан, что дало возможность широко использовать эластомеры в качестве рабочих частей штампов. В последнее время на производстве все чаще применяется гранулированный полиуретан ВИТУР-Т, основными преимуществами которого являются: сочетание пластичности с

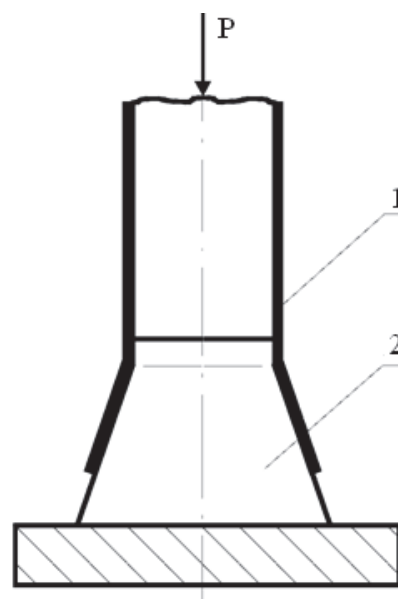


Рис. 3.11. Схема раздачи по жесткому пуансону:
1 – трубная заготовка;
2 – пуансон

твердостью, высокое сопротивление истиранию и сопротивление на разрыв, способность выдерживать высокую нагрузку сжатия (до 250...300 МПа) и ударные нагрузки. С целью уменьшения объема сжимаемой среды в гранулированный полиуретан добавляются стальные шарики, а для уменьшения трения гранул между собой и стенками трубной заготовки - дисульфид молибдена или парафин.

При раздаче в качестве рабочего инструмента выступает пуансон, который выполняется резиновым или полиуретановым и прикрепляется к внутреннему ползуну пресса, а для тонкостенных деталей (толщина стенки 1...2 мм) используется гранулированный полиуретан, что позволяет получить равномерное распределение усилия по всему объему сжимаемой среды благодаря тому, что он является сыпучим материалом, и гранулы в процессе штамповки имеют возможность перемещаться друг относительно друга.

Раздача труб осуществляется в следующей последовательности. В рабочую полость жестких полуматриц, закрепленных на столе пресса, вставляется трубная заготовка. Затем полуматрицы сжимаются боковым усилием для предотвращения их раскрытия в процессе штамповки. Внутри заготовки насыпается гранулированный полиуретан, а сверху на него устанавливается нажимной пуансон, который давит на эластичную среду, и трубная заготовка под действием этого давления принимает форму жесткой матрицы.

Штамп для обжима эластичной средой выполняется в виде контейнера, внутри которого жестко закреплена разъемная матрица заданной формы. На матрицу надевается трубная заготовка и в промежуток между заготовкой и контейнером, т.е. в рабочую полость, насыпается гранулированный полиуретан. Сверху вставляется нажимной пуансон, который от штока гидропресса передает усилие на эластичную среду. Эластичная среда давит на стенку трубы, в результате чего происходит формообразование трубной заготовки по форме жесткой матрицы. В штампах специальных конструкций для обжима и раздачи в качестве рабочего инструмента могут выступать сыпучие и легкоплавкие материалы, жидкости, газы, гидрорезиновые подушки, смеси сыпучих и эластичных наполнителей, плакированная стружка и т.д.

Рассмотрим более подробно основные процессы изготовления элементов трубопроводов и способы их интенсификации. Из всех существующих способов изготовления крутоизогнутых патрубков наиболее экономичным и производительным является способ гибки-раздачи по рогаобразному сердечнику. Особенностью процесса является то, что толщина стенки по выпуклой и вогнутой образующим крутоизогнутого патрубка при правильном подборе технологических параметров равна толщине стенки исходной трубной заготовки. Данный способ является простым в

освоении, не требует большого количества оснастки и сложного специального прессового оборудования.

Схема процесса гибки-раздачи труб по рогообразному сердечнику показана на рис. 3.12. Рогообразный сердечник *1* подается на штангу *б*, которая одним концом жестко закреплена на станине гидравлического пресса, на другом конце штанги *б* крепится промежуточное кольцо *3*. Кольцевой индуктор *2* высокочастотной установки (ВЧУ) предназначен для нагрева сердечника и трубной заготовки в процессе проталкивания её по рогообразному сердечнику. Посредством подвижной траверсы *7* с усилием *P* трубная заготовка *5* наталкивается на рогообразный сердечник, в результате чего образуется крутоизогнутый патрубок. Промежуточное кольцо *3* служит для предотвращения теплопередачи от сердечника к штанге. В зазор *4* между штангой и трубной заготовкой осуществляется подача смазки. При индукционном способе нагрева металла происходит под воздействием вихревых токов, наводящихся в заготовке, и переменных электромагнитных полей индуктора. Интенсивность индукционного нагрева металлов определяется частотой и напряженностью электромагнитного поля.

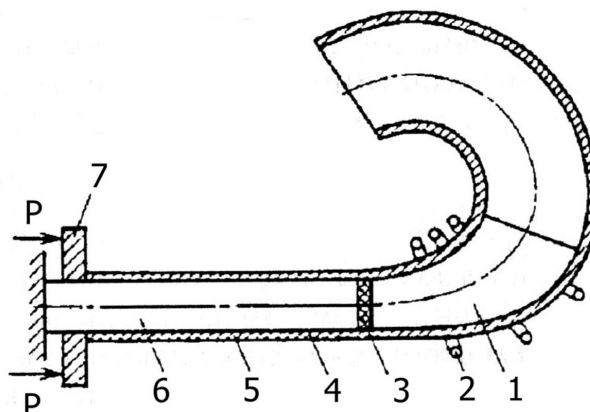


Рис. 3.12. Схема процесса гибки-раздачи по рогообразному сердечнику

Актуальной задачей является разработка методики расчета, проектирования и внедрения рогообразного сердечника наиболее совершенной конструкции в серийное производство.

В данном пособии приведена методика проектирования сердечника для получения крутоизогнутых патрубков из сплава АМг2М диаметрами от 15 до 100 мм, с толщиной стенки 0,8...2,0 мм, с радиусами изгиба патрубка до $0,75D$.

Оптимальной является конструкция рогообразного сердечника (рис. 3.13), который может быть разбит на три основных участка:

1 – направляющий – служит для направления трубы при наталкивании ее на сердечник;

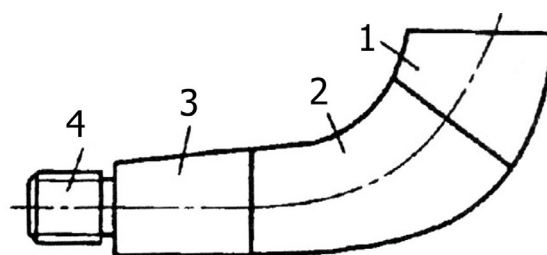


Рис. 3.13. Схема рогообразного сердечника:
 1 – направляющий участок;
 2 – формообразующий участок;
 3 – калибрующий участок;
 4 – хвостовик

2 – формообразующий – основной, при протяжке по которому происходит основное формообразование крутоизогнутых патрубков;

3 – калибрующий – служит для калибровки внутреннего диаметра, радиусагиба и спиралевидности крутоизогнутого патрубка.

Хвостовик предназначен для крепления рогообразного сердечника.

Исходными данными для построения сердечника служат: $R_{ги}$ – радиус изгиба крутоизогнутого патрубка; $D_{н}$ – наружный диаметр крутоизогнутого патрубка; S – толщина стенки крутоизогнутого патрубка.

Рекомендуется следующий порядок и принцип расчета сердечника.

1) Определяется наружный диаметр трубной заготовки по формуле

$$d_{н} = D_{н}/(1+D_{н}/2R_{ги}).$$

2) Находится ближайший диаметр трубы из сортамента, поступающего на предприятие.

3) Определяются размеры переходного участка: диаметры d_1 и его длина. Диаметр d_0 принимается равным внутреннему диаметру трубной заготовки с учетом минусового поля допуска на диаметр и плюсового поля допуска на толщину стенки трубы по ГОСТ 22897-77, 19277-73:

$$d_0 = d_{н} - 2S - \Delta_1 - 2\Delta_2 - 1,$$

где Δ_1 – нижнее отклонение поля допуска трубы на диаметре; Δ_2 – верхнее отклонение поля допуска на толщину стенок трубы.

Длина и диаметр направляющего участка определяется исходя из конструктивно-технологических особенностей самого процесса протяжки. Они зависят от поля допусков на диаметр и толщину заготовки, марки материала. Экспериментально установлено, что длина направляющего участка равна 1,5 диаметрам исходной трубной заготовки.

4) Определяется конечный диаметр сердечника, который принимается равным внутреннему диаметру крутоизогнутого патрубка:

$$D = D_{н} - 2S.$$

5) Определяется разность между другими диаметрами конечного сечения формообразующего участка и начального сечения направляющего участка сердечника:

$$\Delta D = D - d_0.$$

6) Длину формообразующего участка делим на 3...10 частей в зависимости от точности построения длины сердечника и получаем желательное целое число значений приращения диаметра от сечения к сечению. Определяем среднее приращение диаметра:

$$\Delta d = \Delta D/\pi.$$

Приращение диаметра каждого последующего сечения выразится последовательным увеличением ряда целых чисел, сумма которых соста-

вит разность между диаметрами конечного сечения формообразующего участка и начального сечения направляющего участка сердечника:

$$\Delta D = \sum_{i=1}^n \Delta d_i.$$

7) Средняя линия формообразующего участка на каждом из этих участков должна быть очерчена своим радиусом и определяется формулой

$$p_n = \frac{d_i d_0}{2(d_i - d_0)},$$

где d_i – текущий диаметр сечения сердечника; $i = 0, 1, 2$ и т.д. – число сечений сердечника.

8) Диаметр конечного сечения формообразующей части сердечника:

$$d_n = 63 - 2 \cdot 1,0 = 61 \text{ мм.}$$

9) Фактический внутренний диаметр трубной заготовки и диаметр начального (нулевого) сечения сердечника:

$$d_0 = 42 - 2 \cdot 1,0 = 40 \text{ мм.}$$

10) Разность между диаметрами конечного и начального сечений:

$$d_n - d_0 = 61 - 40 = 21 \text{ мм.}$$

11) Приращение диаметра от сечения к сечению разбиваем шестью сечениями на пять участков. Начальное сечение формообразующего участка $d_0 = 42$ мм, отсюда:

$$P = \frac{d_n - d_0}{5} = \frac{61 - 42}{5} = 3,9.$$

12) Средняя линия на каждом из пяти участков должна быть очерчена радиусом, определяемым формулой

$$p = \frac{d d_1}{2(d - d_1)}.$$

13) Задается конусность k сердечника и определяется шаг сечений. Принимается $k_1 = 0,18$ для первых трех сечений, $k_2 = 0,14$ для последующих трех сечений.

14) Задается конусность k сердечника и определяется шаг сечений Δl , причем конусность в разных сечениях сердечника различная в зависимости от приращения текущего диаметра сечений:

$$\Delta l = \frac{\Delta d}{k}.$$

15) По полученным данным строятся профили сердечников.

Перспективным является устройство для изготовления крутоизогнутых патрубков, показанное на рис. 3.14.

Устройство содержит переднюю 4 и заднюю 1 неподвижные траверсы. В траверсах 4 и 1 укреплены направляющие колонки 3, на которых установлена с возможностью перемещения от рабочих цилиндров 10, установленных на траверсе 1, подвижная траверса 2 с выполненным на ней цилиндрическим кольцевым выступом 9, рогообразный сердечник, состоящий из направляющей 5 и формообразующей 6 частей. Устройство содержит также многovitковый нагревательный индуктор 7.

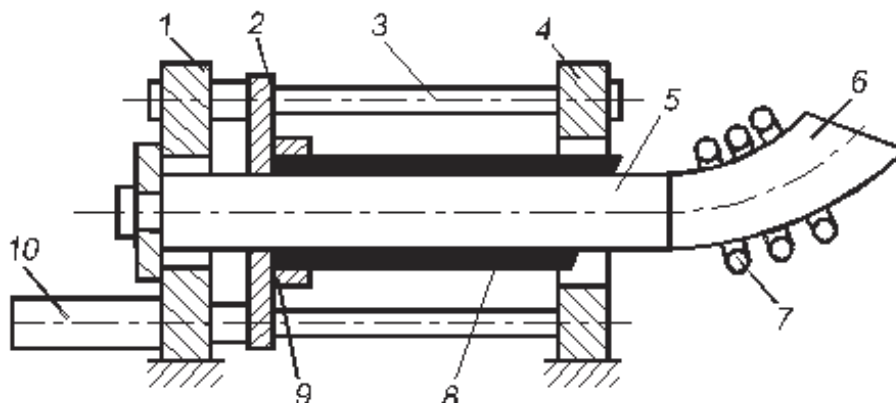


Рис. 3.14. Схема устройства для изготовления крутоизогнутого патрубка

В процессе формообразования трубная заготовка 8 с помощью механизма подачи проталкивается по рогообразному сердечнику. Под воздействием осевой нагрузки, возникающей при проталкивании заготовки по формообразующей части сердечника, возможна потеря устойчивости стенки трубы. Опасная зона в этом случае находится на контуре очага деформации, по которому приложено внешнее усилие. Поэтому в первую очередь непосредственно в зоне передачи усилия в описываемом устройстве кольцевой выступ 9 обеспечивает защемление торцевой части трубной заготовки, что исключает потерю устойчивости стенки трубной заготовки и препятствует образованию гофр.

Кольцевой выступ выполнен с внутренним диаметром, равным диаметру деформируемой трубной заготовки, и высотой, равной половине отношения наружного диаметра заготовки к толщине ее стенки $H = D/0,5S$, где H – высота выступа, мм; D – наружный диаметр трубной заготовки, мм; S – толщина стенки трубной заготовки, мм.

Кроме того, на переднем торце заготовки предварительно выполняют скос под углом к продольной ее оси, а при гибке заготовку располагают относительно рогообразного сердечника острым углом скоса со стороны его образующей с вогнутым профилем максимальной кривизны.

Как известно, опасной зоной при протяжке труб по рогообразному сердечнику является передний торец трубы, взаимодействующий с вогнутой образующей рогообразного сердечника, имеющей максимальную кри-

визну. В процессе изготовления крутоизогнутого отвода по предложенному способу происходит наталкивание трубной заготовки по вогнутым образующим сердечника ее острым углом скоса. При таком расположении угла скоса больших напряжений в опасной зоне заготовки не возникает, так как передний острый угол практически не подвержен воздействию усилий раздачи, поскольку его сечение, перпендикулярное продольной оси заготовки, не является замкнутым, благодаря чему в указанной зоне не возникает максимальных деформаций растяжения и сил трения, и тем самым устраняется возможность появления разрывов.

Использование предлагаемого способа по сравнению с известными способами обеспечивает существенное улучшение качества отводов и повышение выхода годной продукции вследствие устранения возможности появления разрывов по торцам отводов; снижение трудоемкости процесса изготовления крутоизогнутых отводов с малой относительной толщиной стенки в результате сокращения подготовительного времени, затрачиваемого на переналадку устройства в случае появления разрывов.

Под операцией раздачи концов труб по конусообразному пуансону понимается увеличение диаметра трубной заготовки осевой силой.

Процесс раздачи концов труб показан на рис. 3.15, *а*, где изображена схема устройства до деформирования; на рис. 3.15, *б* – схема устройства после раздачи концов труб. Устройство содержит штангу *б*, на свободном конце которой установлен пуансон *5*, и трубную заготовку *7*. На заготовке *7* соосно и последовательно друг за другом установлены две втулки *3* и *2*, без зазора между наружной поверхностью трубной заготовки и внутренней поверхностью втулок. Ближайшая к пуансону втулка *3* выполнена из более пластичного материала, чем материал заготовки. Торцовые части обеих втулок контактируют с подвижной траверсой *1*. На пуансон *5* установлено кольцо *4* для съема готовой детали с втулками.

Устройство работает следующим образом. На направляющую штангу *б* устанавливают последовательно траверсу *1*, трубную заготовку *7*, втулки *3* и *2*, пуансон *5*. При подаче усилия *P* на траверсу *1* начинается её перемещение вдоль штанги *б* вместе с трубной заготовкой *7* и втулками *3* и *2*. После окончания формообразования усилие *P* на траверсу снимают и прикладывают усилие *F* на кольцо, вследствие чего заготовка и втулки снимаются с пуансона.

В устройстве для раздачи концов труб ближайшая к пуансону втулка выполнена из более пластичного материала, чем материал заготовки. При движении подвижной траверсы вдоль штанги трубная заготовка вместе с закрепленными на ней втулками начинает наталкиваться на пуансон. По мере перемещения траверсы трубная заготовка и ближайшая к пуансону втулка деформируются, и растет гидростатическое давление втулки на заготовку по нормали к ее внешней поверхности. Это препятствует разруше-

нию переднего торца трубной заготовки и потере устойчивости стенки трубы при ее раздаче, что позволяет увеличить предельную степень формоизменения процесса.

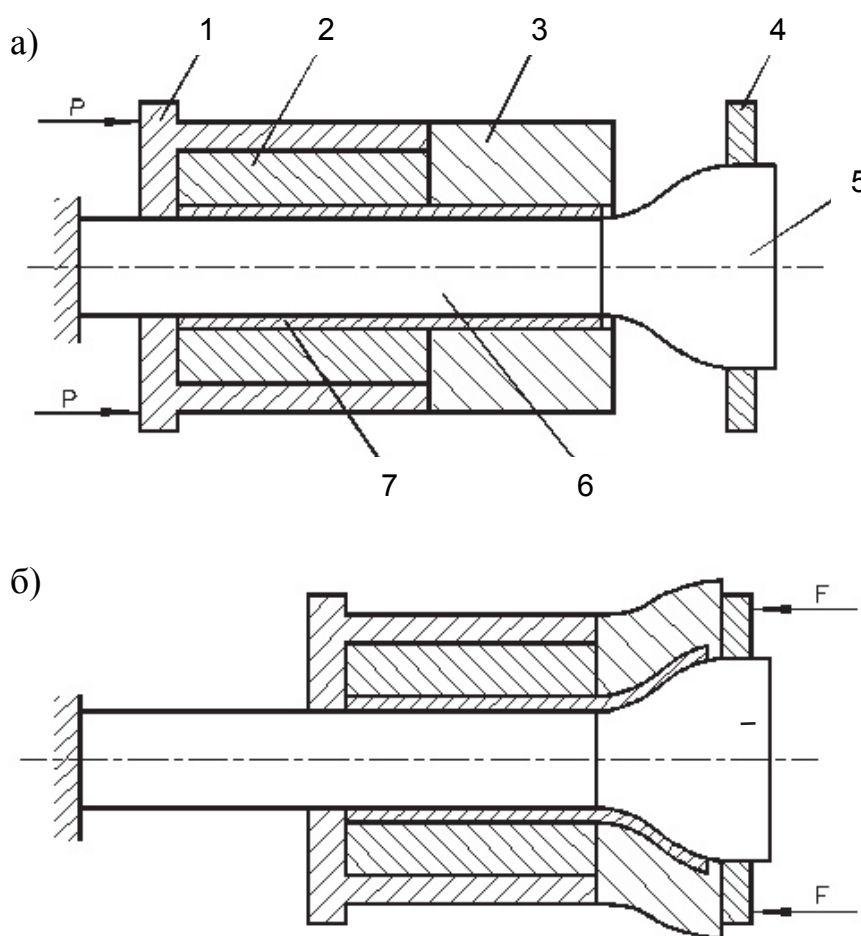


Рис. 3.15. Схема устройства для раздачи концов труб:
а – до деформации; б – после деформации

Рациональная конструкция пуансона для раздачи концов труб, обеспечивающая необходимый режим нагрева, показана на рис. 3.16. Пуансон содержит следующие элементы: хвостовик 1, на котором последовательно расположены цилиндрическая 2 и коническая 3 части, составляющие направляющий участок, вогнутая 4 и выпуклая 5, составляющие формообразующий участок, коническая 6 и цилиндрическая 7, составляющие калибрующий участок. Причем направляющий и калибрующий участки выполнены из материала с низкой магнитной проницаемостью и незначительной подверженностью к нагреву, а формообразующий участок – из высокоуглеродистой стали, подверженной быстрому нагреву при помещении ее в высокочастотное поле. Такая сборно-разъемная конструкция пуансона позволяет, во-первых, осуществлять раздачу концов труб различных формы и размеров за счет изменения геометрических параметров отдельных ее частей, во-вторых, варьируя радиусами вогнутой и выпуклой поверхностей и

углом конусности направляющего и калибрующего участков, производить экспериментальную отработку оптимальной формы пуансона для труб из различных материалов; в-третьих, так как пуансон собран из различных материалов – осуществлять различные режимы нагрева, например, дифференцированный нагрев, т.е. нагрев формообразующего участка пуансона, что ведет к увеличению степени деформации металла трубы в зоне ее деформирования, повышению степени ее устойчивости в начале очага деформации и улучшению качества за счет незначительного нагрева направляющего и калибрующего участков.

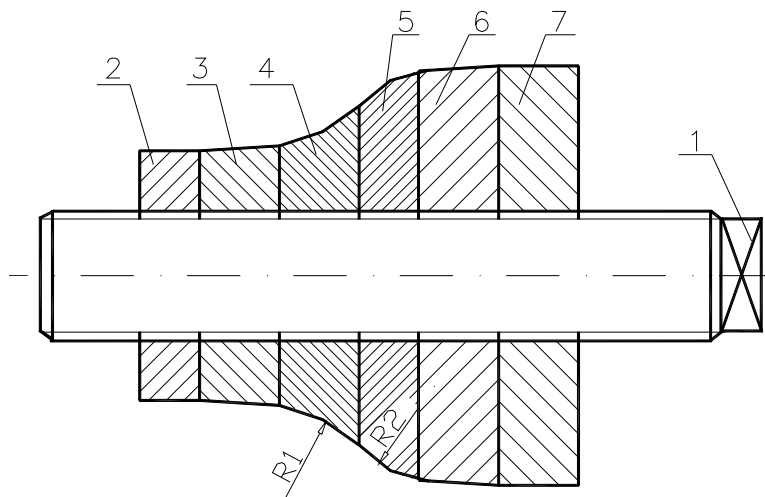


Рис. 3.16. Конструкция пуансона для раздачи концов труб

Одним из перспективных способов раздачи концов труб является пакетный способ. На рис. 3.17 показана схема устройства для раздачи концов труб. Устройство содержит следующие элементы: направляющую штангу 1, на свободном конце которой установлен пуансон 2, трубную заготовку 3 с внутренним диаметром, равным внешнему диаметру штанги 1, и внешнюю трубную заготовку 4, в зазоре между которыми находится вязкая смесь 5. Трубы 3 и 4 разделены между собой кольцом 6. Торцевые части трубы контактируют с подвижной траверсой 7.

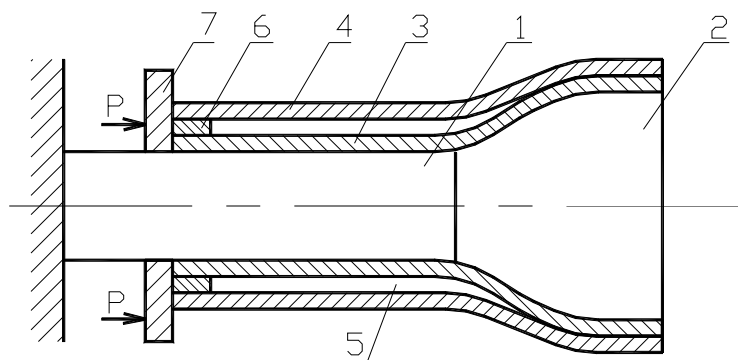


Рис. 3.17. Схема раздачи концов труб пакетным способом

Устройство работает следующим образом. На направляющую штангу 1 устанавливают последовательно траверсу 7, трубы 3 и 4, разведенные кольцом 6. Зазор между трубами заполняют вязкой смесью 5 и устанавливают пуансон 2. При подаче усилия на траверсу 7 начинается ее перемещение вдоль штанги 1 вместе с трубами 3, 4 и кольцом 6. После смыкания зазора между внутренней и внешней трубами 3 и 4 при дальнейшем движении траверсы 7 объем вязкой смеси 5 уменьшается, за счет чего создается давление, действующее на трубные заготовки. При движении подвижной траверсы вдоль штанги трубная заготовка меньшего диаметра начинает наталкиваться на пуансон до тех пор, пока не сомкнется с внешней заготовкой, отцентрированной относительно внутренней с помощью кольца.

В результате смыкания концов заготовок в зазоре между ними образуется замкнутое пространство, в котором создается повышенное давление вязкой смеси. Давление вязкой смеси передается на стенки трубных заготовок, что приводит к уменьшению вероятности гофрообразования обеих труб. Следовательно, увеличивается и предельная степень формоизменения процесса.

При дальнейшем движении траверсы объем смеси между трубами уменьшается, а ее излишки выдавливаются в зазор между трубами, так как кольцо между трубами выполняет роль герметизирующего элемента с противоположной стороны. При этом внешняя труба не имеет контакта ни с направляющей траверсой, ни с поверхностью пуансона, так как осуществляется режим гидродинамической смазки. Качество ее внутренней поверхности улучшается.

Данное устройство позволяет за один рабочий ход получить сразу две детали различной номенклатуры, что значительно повышает производительность процесса раздачи концов труб. При необходимости количество одновременно деформируемых заготовок можно увеличить, устанавливая между ними кольца и заполняя зазор вязкой смесью.

Процесс изготовления фланца раздачей на конце трубы показан на рис. 3.18. Устройство содержит пуансон 1, нагревательный индуктор 2. На направляющую часть пуансона надеты подпорная 3 и основная 4 трубные заготовки. Трубная заготовка 4 имеет форму цилиндра, у которого торец формируемой части неперпендикулярен к его оси, а два противоположных участка торца формируемой части выполнены вогнутыми цилиндрическими.

Способ изготовления фланца осуществляется в следующей последовательности. На направляющую часть пуансона надевают подпорную 3 и основную 4 трубные заготовки и жестко закрепляют пуансон 1 на прессе. Основную заготовку 4, один из торцов у которой обрезан по вогнутому радиусу, устанавливают таким образом, чтобы при последующем наталкивании ее на пуансон, формообразование происходило острыми углами по минимальным радиусам пуансона.

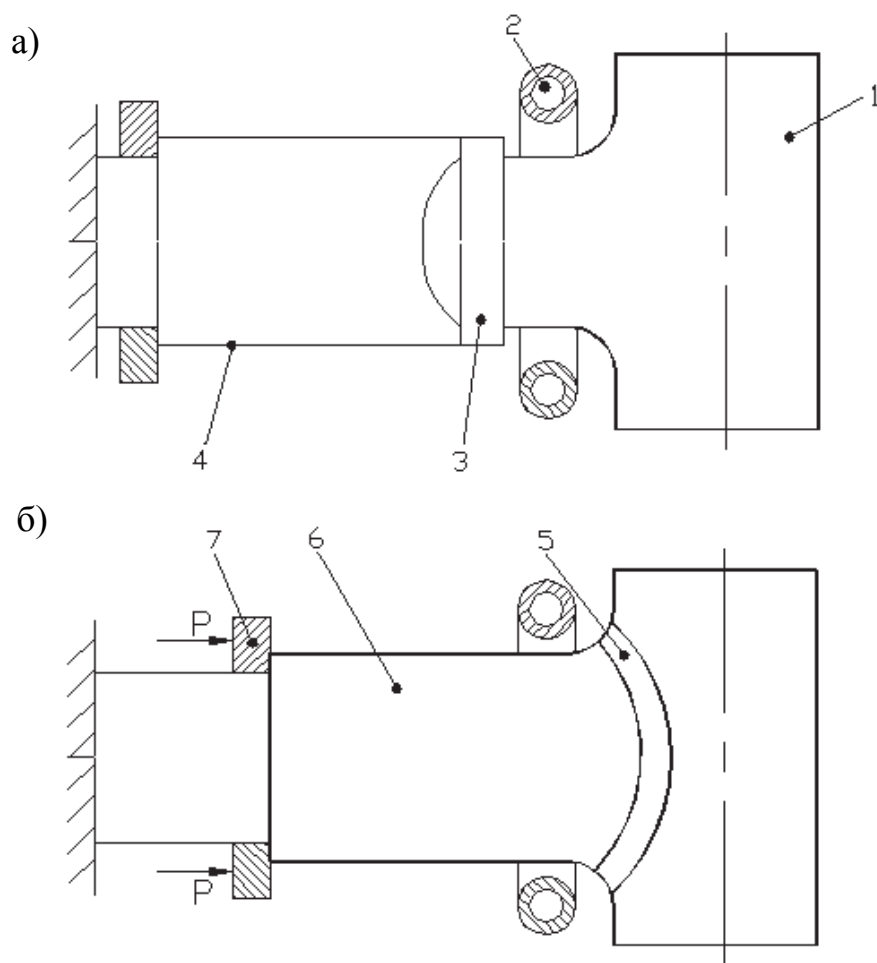


Рис. 3.18. Схема изготовления фланца раздачи на конце трубы:
а – исходное положение; б – заключительный момент

Включают нагрев посредством индуктора 2. Предварительно нагревают пуансон до необходимой температуры и осуществляют наталкивание с усилием P подвижной траверсой 7 заготовок 3 и 4 на пуансон 1, не выключая нагрева, в результате чего происходит деформирование кольца 5 и формообразование равностенного фланца 6. А это повышает его работоспособность в системе трубопроводов, кроме того, равностенность обеспечивает качественную стыковую сварку фланца с магистральным трубопроводом.

Формообразование гнутых элементов, крутоизогнутых и ступенчатых патрубков из коррозионно-стойких сталей, алюминиевых и титановых сплавов диаметром от 20 до 100 мм может осуществляться на специализированном прессе модели ПГФП-20/100. Формообразование этих же элементов диаметром от 50 до 160 мм может производиться на специализированном гидравлическом прессе модели ПШП 50/200. Формообразование крутоизогнутых и ступенчатых патрубков осуществляется также методом проталкивания трубной заготовки с легкоплавким или эластичным напол-

нителем в разъемную матрицу специального штампа с внутренним давлением (рис. 3.19 – 3.20).

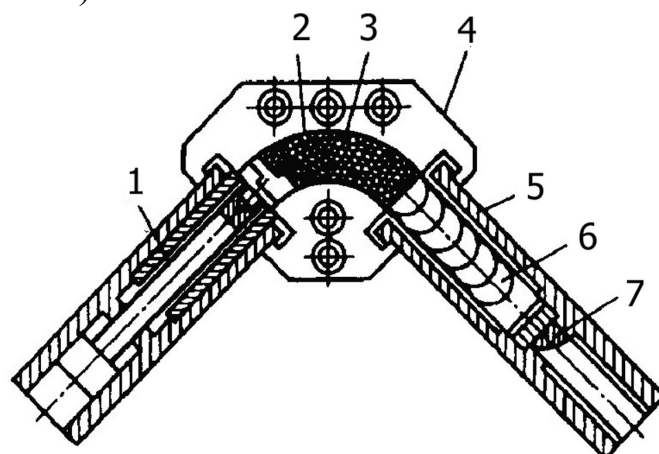


Рис. 3.19. Схема гибки трубной заготовки в жесткой матрице:
1 – рабочий шток; 2 – трубная заготовка; 3 – эластичные гранулы;
4 – матрица; 5 – цилиндр; 6 – гибкая оправка; 7 – подпорный шток

При гибке проталкиванием в жесткую матрицу с внутренним давлением заготовка, помещаемая в прямолинейную часть ручья жесткой матрицы и заполненная эластичным наполнителем, проталкивается через криволинейную часть жесткой матрицы с одновременным сжатием наполнителя между проталкивающим пуансоном и гибкой подпорной составной оправкой.

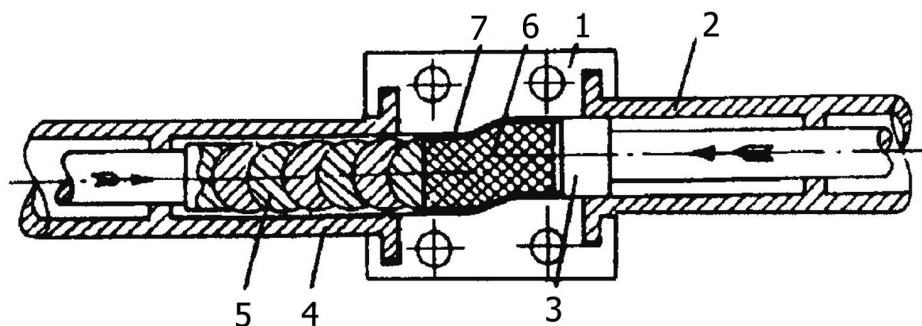


Рис. 3.20. Схема устройства для формообразования ступенчатого патрубка:
1 – разъемная матрица; 2 – гильза установки заготовки; 3 – пуансон проталкивания; 4 – гильза установки шарового пуансона; 5 – сборный шаровой пуансон; 6 – наполнитель; 7 – заготовка

При этом трубная заготовка входной частью наталкивается на криволинейную поверхность ручья и под действием возникающих поперечных давлений со стороны жесткой матрицы изгибается с радиусом кривизны, соответствующим радиусу кривизны ручья жесткой матрицы. Давление наполнителя, образовавшееся в результате сжатия его между пуансоном и гибкой подпорной оправкой, препятствует образованию дефектов при гибке трубных заготовок – гофрообразования и овальности сечения.

Существует несколько схем процесса гибки труб проталкиванием в жесткую матрицу с внутренним давлением в зависимости от вида наполнителя и способа создания в нем давления.

Наполнитель заготовки может быть твердым, жидким или комбинированным, а также эластичным (резина) или пластичным (парафин, сорбит, сплав Вуда). В качестве жидкого наполнителя используются вода, эмульсия, машинное масло. Комбинированный наполнитель представляет собой резиновый мешок, наполненный жидкостью.

Наполнитель трубной заготовки должен иметь быструтекучесть, высокие пластичность и вязкость, высокую способность передачи давления по всей зоне металла, легкость ввода в заготовку и удаления из готовой детали. Всеми указанными выше свойствами обладает термопластичный гранулированный полиуретан, перемешанный с дисульфидом молибдена или парафином.

3.3. Калибровка концов труб и патрубков

Калибровка концов труб и патрубков применяется при подготовке трубопроводов под сварку кольцевых стыков, развальцовку, пайку, заделку концов труб в арматуру раскаткой и импульсным дорнованием, а также под термомеханическое соединение труб. Калибровка концов труб может быть применена как для цельнотянутых труб, так и для труб и элементов трубопроводов, имеющих продольные сварные швы, в том числе для прямых концов крутоизогнутых патрубков.

Существуют следующие технологические процессы калибровки концов труб и патрубков:

- обжатие двухсекторной матрицей;
- калибровка многосекторным инструментом с термофиксацией;
- раздача эластичной средой в жесткой матрице;
- обжатие четырехсекторной матрицей;
- раздача-обжатие четырехсекторной матрицей и восьмисекторным пуансоном.

Калибровка концов труб и патрубков в штампах с двухсекторными разъемными матрицами применяется в мелкосерийном и единичном производстве. Этот способ характеризуется использованием широко распространенного универсального оборудования – кривошипных прессов и простой штамповой оснастки и инструмента; применяется для труб с $D_n = 12...160$ мм.

Возможны следующие способы калибровки труб и патрубков в двухсекторной разъемной матрице:

- обжатие с осевой подачей и поворотом заготовки на заданный угол за каждый рабочий ход пресса (рис. 3.21);

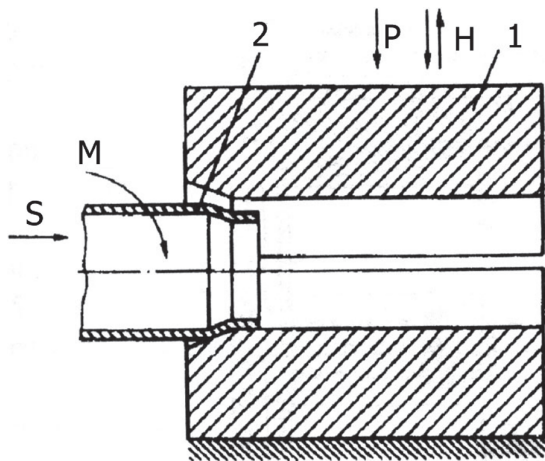


Рис. 3.21. Схема калибровки патрубков с осевой подачей и поворотом на заданный угол за каждый рабочий ход прессы:

1 – матрица двухсекторная;
 2 – заготовка; S – подача;
 M – момент вращения;
 H – число ходов прессы;
 P – усилие

- обжатие заготовки по всей длине калибровки (до 80 мм) – непрерывное деформирование (рис. 3.22);

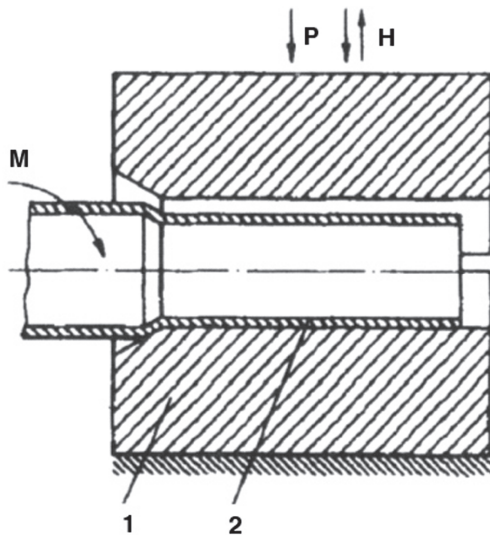


Рис. 3.22. Схема калибровки патрубков по всей длине:

1 – матрица двухсекторная;
 2 – заготовка; M – момент вращения;
 P – усилие нажатия;
 H – число нажатий

- обжатие заготовки по всей длине калибровки с постепенным изменением закрытой высоты штампа – пульсирующее деформирование (рис. 3.23).

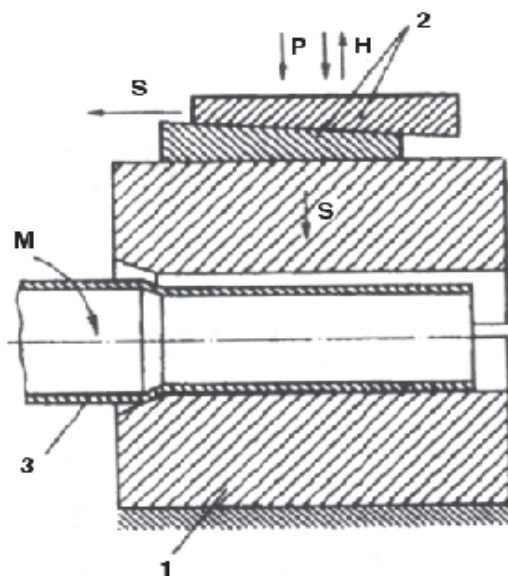


Рис. 3.23. Схема калибровки патрубков по всей длине с постепенным изменением закрытой высоты штампа:

1 – двухсекторная матрица;
 2 – клинья механизма регулирования закрытой высоты штампа;
 3 – заготовка

Последний способ является наилучшим из перечисленных. Обжатие с изменением закрытой высоты штампа осуществляется с уменьшением диаметра калибруемого участка трубы (патрубка) от 0,05 до 0,1 мм на каждый рабочий ход пресса и поворотом заготовки на угол от 15 до 20° вокруг продольной оси с применением жестких оправок.

Калибровка труб (патрубков) радиальным обжатием с пульсирующим приложением нагрузки позволяет:

- уменьшить пружинение по сравнению с непрерывным приложением нагрузки в 1,6...2,3 раза;
- получить точность калибруемых диаметров от $\pm 0,1$ до $\pm 0,15$ мм;
- достичь минимальной эллипсности до 0,2 мм при длине калибруемого участка 80 мм;
- калибровать концы труб (патрубков) без потери устойчивости стенки трубы толщиной 0,8...1,0 мм при тангенциальных деформациях до 1,4 %.

Если деформация превышает допустимые значения, то необходимо применять многопереходную калибровку. Калибровку двухсекторной разъемной матрицей рекомендуется использовать при разовом применении в производстве, как при калибровке концов, так и длинномерных труб.

Штамп для калибровки концов труб и патрубков двухсекторной матрицей имеет механизм регулировки закрытой высоты штампа и подающий механизм (рис. 3.24); устанавливается на стол кривошипного пресса К117Е. Калибровка раздачей эластичной средой может осуществляться на установке последовательного формообразования сильфонов типа УПФС-1 (рис. 3.25) с измененной конструкцией штока и матрицы, а также на станках СКТ 6/50, СЗКТ 14/50, СЗКТ 50/120. Этот способ калибровки может использоваться для труб и патрубков диаметром 14...250 мм. Раздача осуществляется эластичным пуансоном в двухсекторной разъемной матрице, имеющей гладкую цилиндрическую поверхность. Схема устройства для калибровки эластичной средой приведена на рис. 3.26.

В качестве эластичного пуансона используется резина с твердостью 40...80 единиц по Шору и относительным удлинением от 200 до 500 %. Вместо резины может использоваться полиуретан, являющийся хорошим износостойким материалом. Качественная и равномерная раздача трубы или патрубка обеспечивается при плотной посадке резинового пуансона в виде цилиндра на рабочий шток установки.

Калибруемая труба устанавливается на пуансон с некоторым натягом, так как при значительных зазорах между внутренней поверхностью трубы и зажимным фланцем формирующей головки установки резиновый пуансон в процессе раздачи трубы вытекает в зазор и расслаивается, при этом калибруемая труба заклинивается на пуансоне.

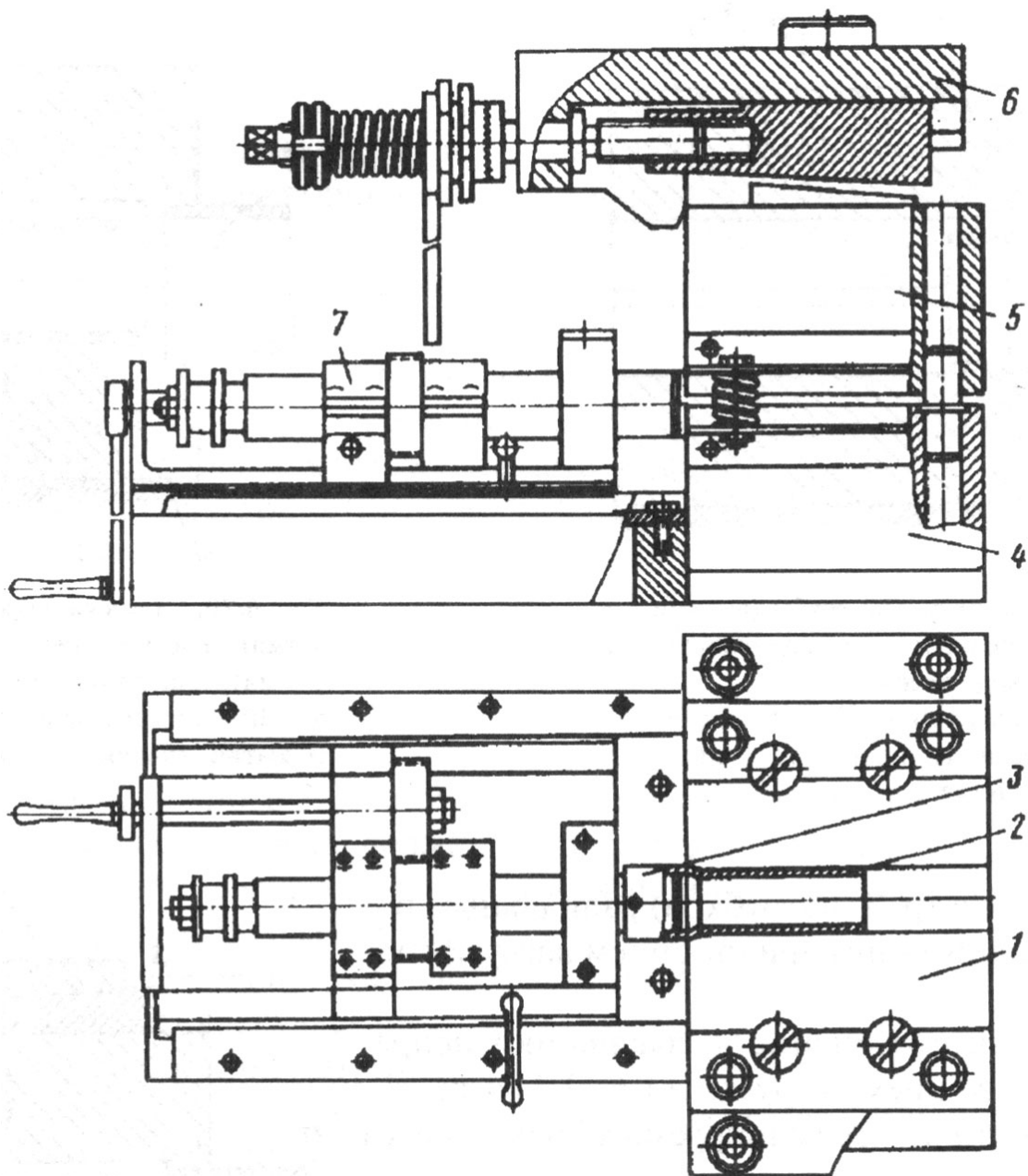


Рис. 3.24. Общий вид штампа для калибровки труб
двухсекторной матрицей:

- 1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – оправка; 4 – нижняя плита;
5 – верхняя плита; 6 – механизм регулировки закрытой высоты
штампа; 7 – подающий механизм

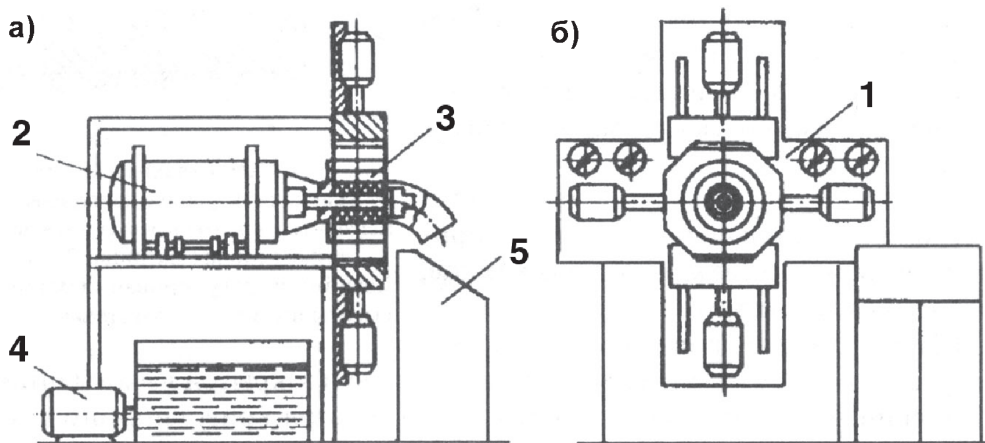


Рис. 3.25. Схема установки УПФС-1:
 1 – станина; 2 – силовой цилиндр; 3 – формующая головка; 4 – гидропривод; 5 – пульт управления

Наличие указанных выше дефектов делает этот способ калибровки малопригодным для массового производства, особенно для труб и патрубков с продольными сварными швами, характеризующихся большими отклонениями по некруглости калибруемых диаметров и значительной жесткостью сечений.

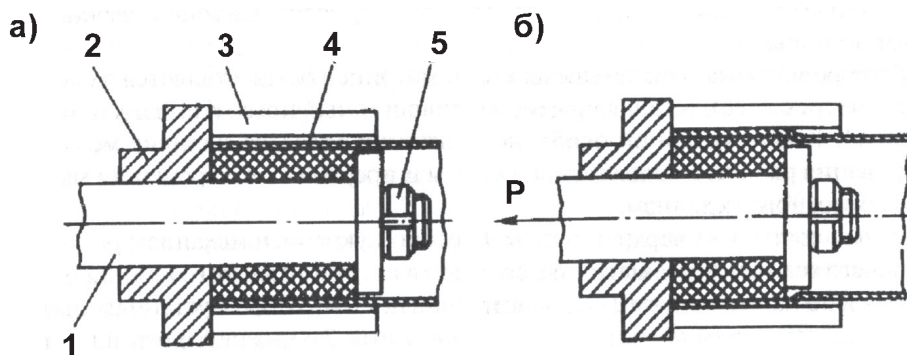


Рис. 3.26. Схема калибровки эластичной средой:
 а – перед раздачей трубы; б – в конце раздачи трубы;
 1 – шток; 2 – опорный фланец; 3 – матрица;
 4 – эластичный пуансон; 5 – нажимная гайка

Калибровка концов труб и патрубков обжатием четырехсекторной матрицей (рис. 3.27) объединяет преимущества пульсирующего деформирования с тонкой регулировкой получения точных диаметров труб и патрубков быстрой перестройкой штамповой оснастки на нужный диаметр калибровки. Диаметры калибруемых труб и патрубков находятся в диапазоне 12...120 мм. Калибровка труб и патрубков по всей длине осуществляется как непрерывным, так и пульсирующим деформированием.

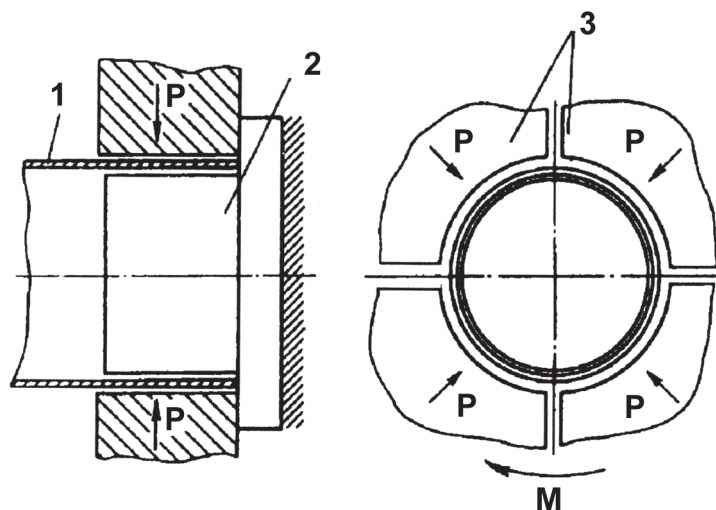


Рис. 3.27. Схема калибровки обжатием четырехсекторной матрицей:
1 – калибруемая труба; 2 – оправка; 3 – секторы матрицы

Калибровке подвергаются элементы трубопровода из цельнотянутых и сварных труб с одним или двумя продольными швами. Калибровка обжатием четырехсекторной матрицей осуществляется в специальном штампе, устанавливаемом на кривошипный пресс К117Е. Конструктивной особенностью штампа является наличие механизмов регулирования рабочего хода секторов матрицы и прерывистого вращения матрицы, а также обжимного механизма.

При калибровке способом раздача-обжатие производится обжатие трубы четырехсекторной матрицей или раздача ее восьмисекторным пуансоном. Рабочее движение секторов матриц и пуансона радиальное: секторы матриц совершают радиальное движение к оси трубы, а секторы пуансона – от оси трубы. Раздача и обжатие трубной заготовки осуществляются одним инструментом. Если диаметр трубной заготовки меньше номинального, то она раздается до требуемого размера диаметра, если больше номинального, то заготовка обжимается также до номинального размера.

Способ раздача-обжатие имеет ряд преимуществ, которые заключаются в том, что одним инструментом можно калибровать с допуском как в плюс, так и в минус, варьировать точность размера диаметра калибруемой трубы в нужном диапазоне, калибровать трубы с продольными сварными швами.

Недостатком способа раздача-обжатие является невозможность калибровки труб диаметром до 40,0 мм в связи с конструктивными особенностями восьмисекторного пуансона. Трубы диаметром до 40,0 мм рекомендуется калибровать обжатием четырехсекторной матрицей в штампе. Способ раздача-обжатие является наиболее универсальным, надежным, высокопроизводительным и простым в эксплуатации.

Для калибровки концов труб и патрубков раздачей используются восьмисекторные пуансоны двух видов: базовые, установленные стационарно, и быстросъемные. Это позволяет значительно снизить трудоемкость переналадки штампа с одного размера калибруемого участка трубы на другой, что очень важно в условиях единичного и мелкосерийного производства. Наличие в штампах механизма регулировки хода секторов матрицы и пуансона, а также прерывистого вращения их при снятии нагрузки позволяет осуществлять следующие режимы калибровки:

- калибровку трубы обжатием до конечного размера диаметра за каждый рабочий ход пресса при отключенном храповом механизме регулировки хода секторов матриц (ход секторов пуансона постоянный, обеспечивает номинальный размер внутреннего диаметра калибруемой трубы);
- калибровку трубы раздачей восьмисекторным пуансоном до конечного размера диаметра за каждый ход пресса (секторы матрицы отведены механизмом регулировки и в работе не участвуют);
- калибровку пульсирующим обжатием с уменьшением диаметра калибруемой трубы на 0,05 мм за каждый рабочий ход с использованием механизма регулировки закрытой высоты штампа; конечный номинальный диаметр трубы достигается за 15...20 рабочих ходов пресса (ход секторов пуансона постоянный, обеспечивает номинальный внутренний диаметр калибруемой трубы). При выполнении перечисленных выше режимов калибровки секторная матрица и пуансон могут осуществлять поворот на угол 15° за каждый рабочий ход пресса при работе механизма поворота матрицы и пуансона или находиться в стационарном положении, если этот механизм отключен.

Калибровка концов труб под заделку в арматуру и развальцовку производится методом обжима. Концы труб с $D_n < 20$ мм рекомендуется калибровать обкаткой роликами наружной поверхности. Схема калибровки представлена на рис. 3.28.

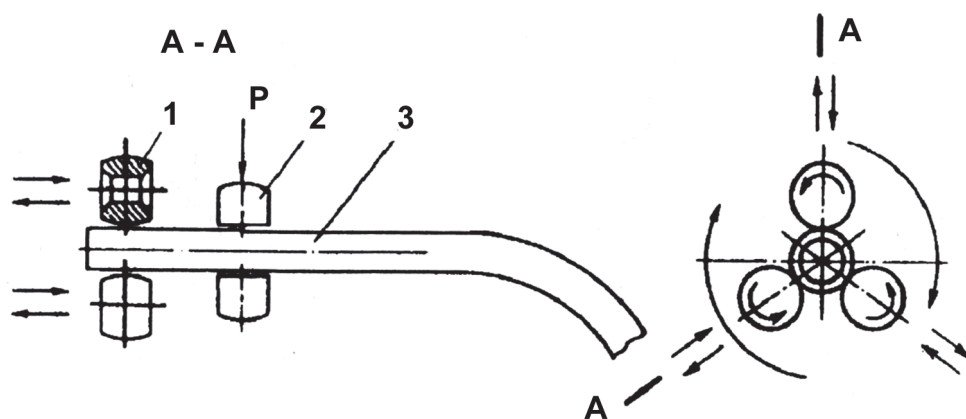


Рис. 3.28. Схема калибровки концов труб обкаткой роликами:
1 – ролики; 2 – устройство крепления трубы; 3 – труба

Сущность процесса заключается в редуцировании (уменьшении) исходного диаметра трубы при подаче ее в фильеру, образованную вращающимися роликами.

3.4. Зиговка концов труб

Для дюритовых соединений концы трубы деформируются по форме и размерам в соответствии с ОСТ 1.140079-81. Формообразование зига может осуществляться раздачей заготовки трубы с помощью роликов, эластичной средой и жидкостью в матрицу (рис. 3.29). Зиговку можно производить на специальных зигмашинах в роликах, станках моделей СЗКТ-14/50 и СЗКТ-50/120 резиной, станках заводской конструкции, а также ручными приспособлениями.

Рабочий профиль роликов выполняется в соответствии с профилем зига и с учетом возможного пружинения. Зиговка концов трубы наружным диаметром до 12 мм включительно производится вручную шариком с использованием специального приспособления.

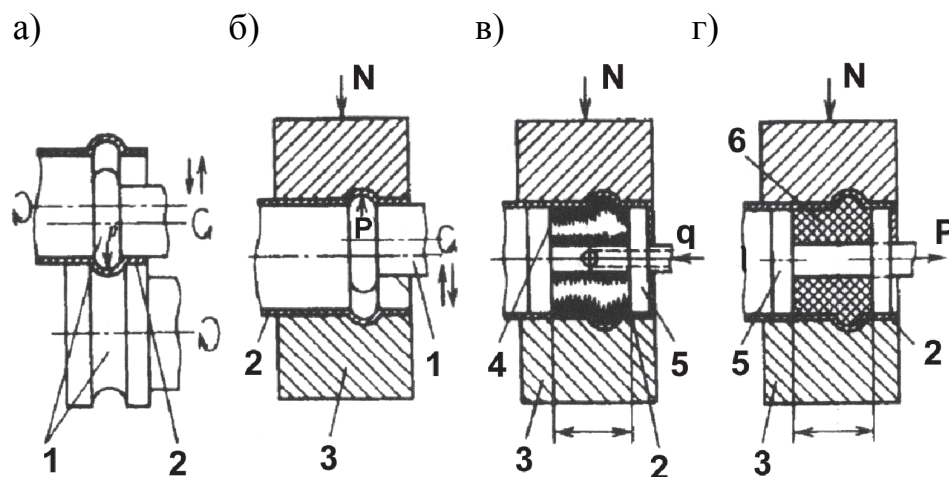


Рис. 3.29. Схемы формообразования зига:

- а – в роликах; б – роликом в матрицу; в – жидкостью через резиновую диафрагму; г – резиновой втулкой;
- 1 – ролики; 2 – труба; 3 – неразъемные матрицы; 4 – резиновая диафрагма; 5 – стержень; 6 – резиновая втулка

Зиговка концов труб наружным диаметром 14 мм и выше производится резиной или жидкостью через резиновую диафрагму в жесткую разъемную матрицу. В состав инструмента для зиговки труб резиной на станках типа СЗКТ входят разъемные полуматрицы, резиновый вкладыш и пуансон. Рабочий контур матрицы в сомкнутом состоянии должен соответствовать контуру детали. Матрица должна быть закалена. Вкладыши

изготавливаются составными или целыми из резины или полиуретана, технические характеристики вкладышей приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Технические характеристики вкладышей

Марка резины	Тип каучука	Сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Шору	Остаточное удлинение, %
3826	СНК	8000 (800)	300	65...75	12
СКУ-6	Уретановый	40 000 (4000)	450	60	0...2
СКУ-7Л	Уретановый	50 000 (5000)	500...550	80...85	2

Наружный диаметр резинового вкладыша (втулки) должен быть меньше внутреннего диаметра зигуемой трубы. Внутренний диаметр втулки должен быть больше диаметра стержня. Рекомендуемые величины зазоров представлены в табл. 3.3. Диаметр стержня можно рассчитать по формуле

$$d_c = K \sqrt{4P / \pi \sigma_s},$$

где K – коэффициент запаса прочности, зависящий от материала стержня; P – технологическое усилие, необходимое для зиговки конца трубы; σ_s – предел прочности материала стержня.

Таблица 3.3

Рекомендуемые величины зазоров

Наружный диаметр трубы, мм	Оптимальная величина одностороннего зазора, мм	
	между внутренним диаметром трубы и наружным диаметром резиновой втулки	между внутренним диаметром резиновой втулки и внешним диаметром стержня
14...30	0,2	0,10
32...50	0,5	0,15
52 и выше	1,0	0,25

Наибольший ход штока для обеспечения формообразования рекомендуется принимать равным 20...25 мм. При формообразовании зига происходят уменьшение длины исходной заготовки и утонение стенки трубы. Длина исходной заготовки должна быть приблизительно равна длине образующей детали с зигом.

Толщина стенки в зоне зига после формообразования определяется по формуле

$$S = S_0 D_n / D_1,$$

где S_0 – толщина стенки исходной заготовки, мм; D_n – наружный диаметр трубы, мм; D_1 – наружный диаметр участка детали с зигом, мм.

Давление пуансона при гидростатическом формировании зига определяется по формуле

$$q = S_0 \sigma_b (2/D_n - 1/r),$$

где S_0 – исходная толщина стенки трубы, мм; σ_b – предел прочности материала трубы, МПа; D_n – наружный диаметр трубы, мм; r – радиус зига, мм.

Усилие пуансона, необходимое для формообразования зига на конце трубы, определяется по формуле

$$P = q F_3,$$

где q – давление пуансона, Па.

$$P = \sigma_b F_3 S_0 (2/D_n - 1/r).$$

Усилие зажима трубчатой заготовки можно определить по формуле

$$N = 1,25 l d_y q,$$

где l – длина зоны нагружения в осевом направлении, мм; d_y – внутренний диаметр трубы, мм; q – давление эластичной среды, Па (кгс/мм).

Трубы, подлежащие зиговке, должны иметь между концом трубы и началом изгиба прямой участок. Для труб с наружным диаметром 8...10 мм прямой участок должен составлять не менее 15 мм, для труб с диаметром 12...28 мм – не менее 20 мм, для труб с наружным диаметром больше или равным 28 мм – не менее 30 мм.

В процессе зиговки рекомендуется в качестве смазки применять машинные масла, которые наносятся на внутреннюю и наружную поверхности трубы. Формообразование зига, происходящее с вращением трубной заготовки, производится роликами, частота вращения которых составляет 6...9 об/мин.

3.5. Отбортовка отверстий в трубах и патрубках

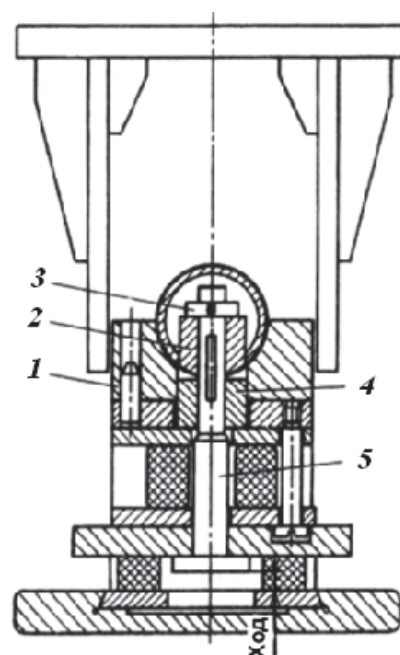
Отбортовка отверстий осуществляется в цельнотянутых сварных и прямошовных трубах и патрубках из коррозионно-стойких сталей, алюминиевых и титановых сплавов. Отбортовка производится в матрицу специального штампа методом протяжки жесткого пуансона из полости трубы (патрубка) через отверстие, выполненное в её стенке.

Для отбортовки отверстий в трубах и патрубках необходимо использовать универсальные гидравлические прессы. Типовой штамп для отбортовки отверстий представлен на рис. 3.30.

Основными технологическими параметрами процесса отбортовки являются: высота борта, диаметр отбортовки, геометрия отверстия, утонение металла, усилие отбортовки.

Рис. 3.30. Штамп для отбортовки отверстий:

- 1 – матрица; 2 – пуансон;
 3 – замок (быстросъемная шайба); 4 – ловитель;
 5 – тяга



Высоту борта H (рис. 3.31, а), получаемую за один переход, можно определить из выражения

$$H = \varepsilon_{\text{доп}} d_{\text{н}} / 2 (1 + \varepsilon_{\text{доп}}),$$

где $\varepsilon_{\text{доп}}$ – допустимая деформация растяжения; $d_{\text{н}}$ – диаметр борта, мм.

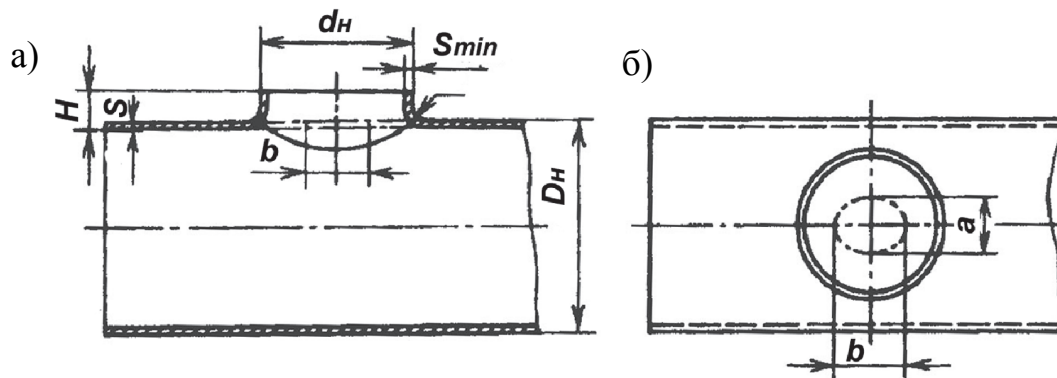


Рис. 3.31. Тройник патрубков: а – геометрические размеры борта; б – геометрические размеры отверстия

В табл. 3.4 приведены значения $\varepsilon_{\text{доп}}$ для различных марок материала.

Таблица 3.4

Значения $\varepsilon_{\text{доп}}$

Марка материала	$\varepsilon_{\text{доп}}$	Марка материала	$\varepsilon_{\text{доп}}$	Марка материала	$\varepsilon_{\text{доп}}$
12X18H10T	0,35	АМцМ	0,23	ВТІ-0	0,34
12ХН9Т	0,34	АМГ2М	0,24	Т1-7М	0,34
АМГ2	0,2	АМГ3М	0,24		
АМГ3	0,2	ОТ4-0	0,33		

Для образования отбортовок на трубах (патрубках) отверстие должно выполняться в виде овала (рис. 3.31, б). При известной высоте борта H можно определить большую ось овала b :

$$b = d_n + 0,86 R + 1,43 S - 2 H,$$

где d_n – диаметр отбортовки, мм; R – радиус перехода, мм; S – толщина стенки, мм.

Малую ось овала a можно определить по формуле

$$a = 0,7b.$$

При значительном увеличении зазора Z между пуансоном и матрицей происходит естественное увеличение радиуса перехода и высоты борта. Степень деформации при этом не уменьшается, но так как в очаг деформации вовлекается большое количество металла, деформация сосредотачивается, и утонение уменьшается. Однако при этом уменьшается и величина цилиндрической части борта h . При отбортовке следует брать Z равным 1,5...2,5 мм. Усилие, необходимое для отбортовки, зависит от толщины стенки трубы (патрубка), марки материала, диаметра отбортовки, геометрических параметров отверстия под отбортовку и может быть определено по формуле

$$P = 1,1 \pi S \sigma_b [(a + b)/2],$$

где σ_b – предел прочности материала.

Отбортовка сопровождается возрастающим по высоте борта утонением металла. Минимальная толщина стенки S_{\min} у края борта (рис. 3.31) может быть определена из равенства:

$$S_{\min} = 1,1S \sqrt{(a + b)/2d_n}.$$

С целью увеличения высоты борта H на трубах из пластических алюминиевых сплавов может применяться местный нагрев зоны деформации. Отверстие под отбортовку выполняется на вертикально-фрезерных станках с последующей запиловкой напильником и шкуркой. Отбортовка отверстий в трубах и патрубках должна осуществляться с обильной смазкой заготовки и оснастки. При высоте фланца больше указанных размеров возникает утонение кромки фланца, превышающее 25 % от толщины стенки исходной трубной заготовки.

Схема изготовления цельнотянутых тройников вытяжкой по конусообразному пуансону через отверстие, предварительно просеченное в стенке трубной заготовки, следующая: внутрь трубной заготовки с просеченным предварительно в стенке трубы отверстием заводится конусообразный пуансон и закрепляется жестко на штангу, которую устанавливают на рабочем штоке гидроцилиндра. Трубная заготовка фиксируется на упорах и на конусообразном пуансоне, после чего выставляется индуктор, который

служит для нагрева зоны деформации металла трубной заготовки и пуансона. После включения нагрева и подачи гидроцилиндра пуансон проталкивается через отверстие трубной заготовки, в результате чего происходит формообразование фланца, т.е. получается элемент трубопровода типа тройника, к которому можно приварить отводную трубу.

Если просечку в стенке трубной заготовки сделать с противоположной стороны и повторить цикл работ, описанный выше, то в результате получается деталь в виде крестовины. Для изготовления элементов трубопровода типа фитинга просечка трубной заготовки осуществляется в нескольких местах, и процесс отбортовки повторяется для каждого просеченного отверстия.

Очень часто при монтаже трубопроводов ответвления подсоединяются под разными углами к основной магистрали. Вытяжка фланца в стенке трубы, к которому ответвление приваривается под углом, осуществляется аналогично с изложенным выше процессом, но при этом привариваемая к основной магистрали труба обрезается под углом и имеет в сечении форму эллипса. Соответственно конусообразный пуансон изготавливается по форме этого эллипса, и после процесса вытяжки фланец имеет форму, аналогичную форме пуансона.

Перспективным является способ отбортовки фланца в стенке трубной заготовки, схема устройства для которого показана на рис. 3.32. Реализация способа осуществляется следующим образом.

В трубной заготовке 1 предварительно вырезают овальное отверстие 2, затем заготовку устанавливают на ложемент 3 и внутрь заводят конический пуансон 4. На внутреннюю поверхность трубной заготовки в зоне отверстия 2 помещают технологическую шайбу 5 с диаметром внутреннего отверстия, меньшим диаметра отверстия 2 на толщину стенки трубной заготовки, обеспечивающего малый коэффициент трения с поверхностью пуансона.

Предложенный способ был опробован при получении фланцев диаметром 12 мм, высотой 4 мм из трубных заготовок с внутренним диаметром 32 мм и толщиной стенки

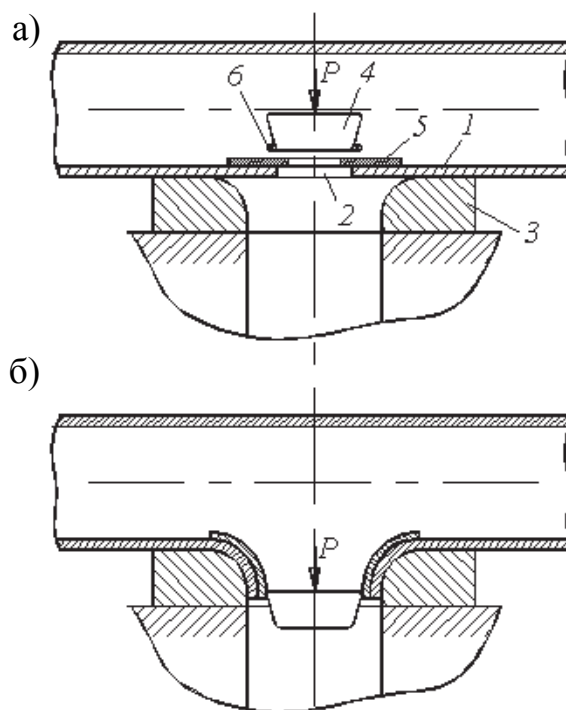


Рис. 3.32. Способ отбортовки фланца в стенке трубы:
а – до начала деформирования;
б – после деформирования

1 мм из коррозионно-стойкой стали марки 12Х18Н10Т. В качестве технологической шайбы использовалась шайба из сплава АМг2 с толщиной 1 мм. В результате реализации данного способа готовые детали имели гладкую внутреннюю поверхность, без царапин, рисок и задигов, что, в свою очередь, позволяло увеличить степень деформации металла.

3.6. Устройство для испытания трубных заготовок

Данное устройство [26] относится к области исследования прочностных свойств изделий из твердых материалов путем приложения к ним механических усилий.

Известные устройства для испытания трубных заготовок при различных температурах, имеют некоторые недостатки, в частности невозможность обнаружения и регистрации развивающихся внутренних дефектов материала трубной заготовки во время испытания.

Описанное в данном разделе устройство, позволяет испытывать трубную заготовку при различных температурах, количественно оценивать величину деформации, отслеживать кинетику процесса пластической деформации по изменению структуры поверхностного слоя и одновременно обнаруживать и регистрировать развивающиеся внутренние дефекты материала трубной заготовки до ее разрушения.

Технический результат, обеспечиваемый устройством, заключается в расширении регистрируемых одновременно показателей деформации при испытании трубной заготовки при различных температурах, а именно, кроме количественной оценки величины деформации и отслеживания кинетики процесса пластической деформации по изменению структуры поверхностного слоя, одновременно обнаруживать и регистрировать развивающиеся внутренние дефекты материала трубной заготовки до ее разрушения путем регистрации упругих колебаний (акустических волн), возникающих при пластической деформации твердых сред.

Это достигается тем, что в устройстве для испытания трубной заготовки на прочность, включающей нажимной пуансон, рабочее тело в виде сыпучего термостойкого неэлектропроводного материала, трансформатор для нагрева трубной заготовки, разъемную матрицу из неэлектропроводного материала, в которой выполнены сквозные пазы, в одном из которых установлена видеочамера, а в другом – шток датчика для измерения величины деформации, датчик для измерения величины деформации и видеочамера соединены с компьютером, дополнительно в матрице установлен с возможностью соприкосновения с трубной заготовкой датчик акустической эмиссии, соединенный с компьютером.

Отличительной особенностью устройства для испытания трубной заготовки на прочность является установленный в матрице (с возможно-

стью соприкосновения с трубной заготовкой) датчик акустической эмиссии, соединенный с компьютером.

Снабжение устройства датчиком акустической эмиссии позволяет регистрировать упругие колебания (акустические волны), возникающие при пластической деформации трубной заготовки, обработка которых на компьютере позволяет обнаруживать и регистрировать развивающиеся внутренние дефекты в материале трубной заготовки. Установка в матрице датчика акустической эмиссии позволяет прочно фиксировать его.

На рис. 3.33 показано устройство для испытаний трубной заготовки.

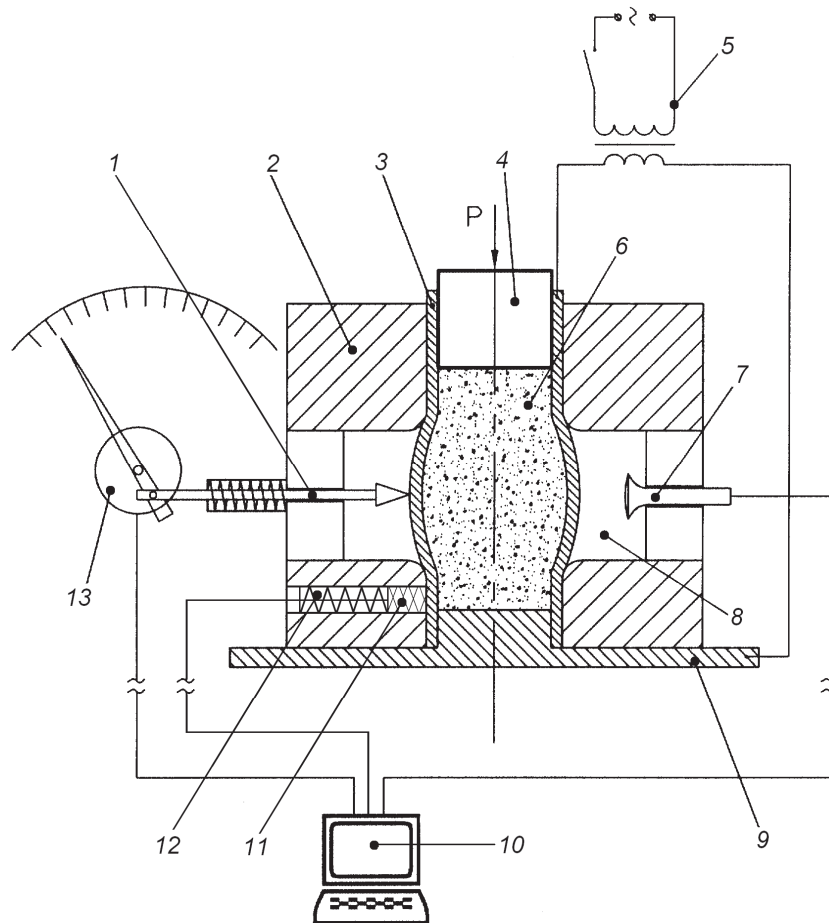


Рис. 3.33. Устройство для испытания трубной заготовки

Предлагаемое устройство содержит разъемную полую матрицу 2, основание 9, в матрицу помещена трубная заготовка 3, с рабочей средой 6. В пазах 8 расположен шток 1 датчика 13 определения величины деформации и цифровая видеочка 7, соединенная с компьютером 10. Ток к заготовке подводят посредством трансформатора 5. Давление P на рабочую среду осуществляют при помощи перемещения пуансона 4. В матрице 2 установлен подпружиненный датчик акустической эмиссии 11, соединенный с компьютером 10. Датчик акустической эмиссии 11 плотно прилегает к поверхности трубной заготовки 3 за счет прижима его пружиной 12.

Устройство работает следующим образом. В разъемную полулю матрицу 2, установленную на основании 9, помещают испытуемую трубную заготовку 3, в которую засыпают диэлектрическую рабочую среду 6 (например, окись алюминия). Трансформатором 5 трубную заготовку нагревают до заданной температуры и воздействием нажимного пуансона 4 на рабочую среду 6 деформируют трубную заготовку с заданной скоростью до её разрушения. Процесс деформации заготовки отслеживают с помощью расположенных в пазах 8 матрицы 2 датчика 13 со штоком 1, видеокамеры 7 и датчика акустической эмиссии 11 (например, датчик акустической эмиссии ZET 7140 AcousticEmission-CAN). Датчик 13 и видеокамера 7 позволяют фиксировать изменения в поверхностном слое заготовки, а датчик акустической эмиссии 11 дает возможность обнаружения и регистрации упругих колебаний (акустических волн), возникающих при пластической деформации трубной заготовки, возникающих и развивающихся внутренних дефектов материала в каждый момент времени при деформации заготовки до её разрушения. Полученная с датчиков информация о деформации, обнаружении дефектов во внутренней структуре материала и разрушении образца сохраняется и затем обрабатывается на компьютере 10.

Устройство позволяет испытывать трубную заготовку при различных температурах, количественно оценивать величину деформации, отслеживать кинетику процесса пластической деформации по изменению структуры поверхностного слоя и по образованию и поведению внутренних дефектов материала трубной заготовки до её разрушения.

4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

4.1. Общие положения и исходная система уравнений

В листовой штамповке формоизменение заготовки наиболее часто осуществляется в условиях осевой симметрии деформирования.

Как установлено в работе [2], при величине отношения толщины заготовки к максимальному ее габариту 0,02 и менее температура по толщине листа меняется незначительно, следовательно, ее можно считать постоянной. Переносом тепла по толщине материала с движущимися частицами также можно пренебречь.

В этом случае радиальные и тангенциальные напряжения, действующие в очаге деформаций, можно считать главными напряжениями, которые усредняются по толщине и относятся к срединной поверхности, как в безмоментной теории оболочек [24].

Силы трения и изгиба на ребре матрицы учитываются после получения окончательного решения по методике, изложенной в работе Е.А. Попова [21].

К числу допущений относятся также основные гипотезы деформационной теории.

4.2. Уравнения равновесия

При формоизменении осесимметричных оболочек, имеющих двойную кривизну с учетом характера изменения толщины заготовки уравнения равновесия сил в проекциях на нормаль и касательную к срединной поверхности удобно представить в виде [6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\rho} [\rho S(\rho) \sigma_\rho \sin \psi] &= -(q_n + q_\tau \operatorname{tg} \psi) \rho + (a_n + a_\tau \operatorname{tg} \psi) \frac{\gamma}{g} \rho \cdot S(\rho); \\ \frac{d}{d\rho} [\rho S(\rho) \sigma_\rho] &= S(\rho) \sigma_\varphi - \frac{q_\tau}{\cos \psi} \rho + \frac{a_\tau}{\cos \psi} \frac{\gamma}{g} \rho \cdot S(\rho), \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где ψ – угол наклона касательной к образующей, отсчитываемый против часовой стрелки от горизонтали; q_n – проекция удельного давления на нормаль, направленную к центру кривизны; q_τ – проекция удельного давления на касательную, направленную в сторону увеличения ρ ; a_n – проекция ускорения на нормаль; a_τ – проекция ускорения на касательную; γ – удельный вес материала; g – ускорение свободного падения.

В случае формоизменения трубчатой заготовки (рис. 4.1), учитывая, что при обжиме и вывороте внутрь

$$q_n = q(\rho), \quad q_\tau = \mu_{TP} q(\rho), \quad \psi = 90^\circ - \alpha,$$

а при раздаче и вывороте наружу

$$q_n = q(\rho), \quad q_\tau = -\mu_{TP} q(\rho), \quad \psi = 270^\circ - \alpha,$$

можно получить уравнение равновесия в виде

$$\frac{d}{d\rho} [\sigma_\rho S(\rho)] = \frac{\sigma_\varphi (1 + \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha) - \sigma_\rho \left(1 + \mu_{TP} \rho \frac{d\alpha}{d\rho} \right)}{\rho} S(\rho). \quad (4.2)$$

Это уравнение справедливо для всех перечисленных процессов формоизменения трубчатой заготовки.

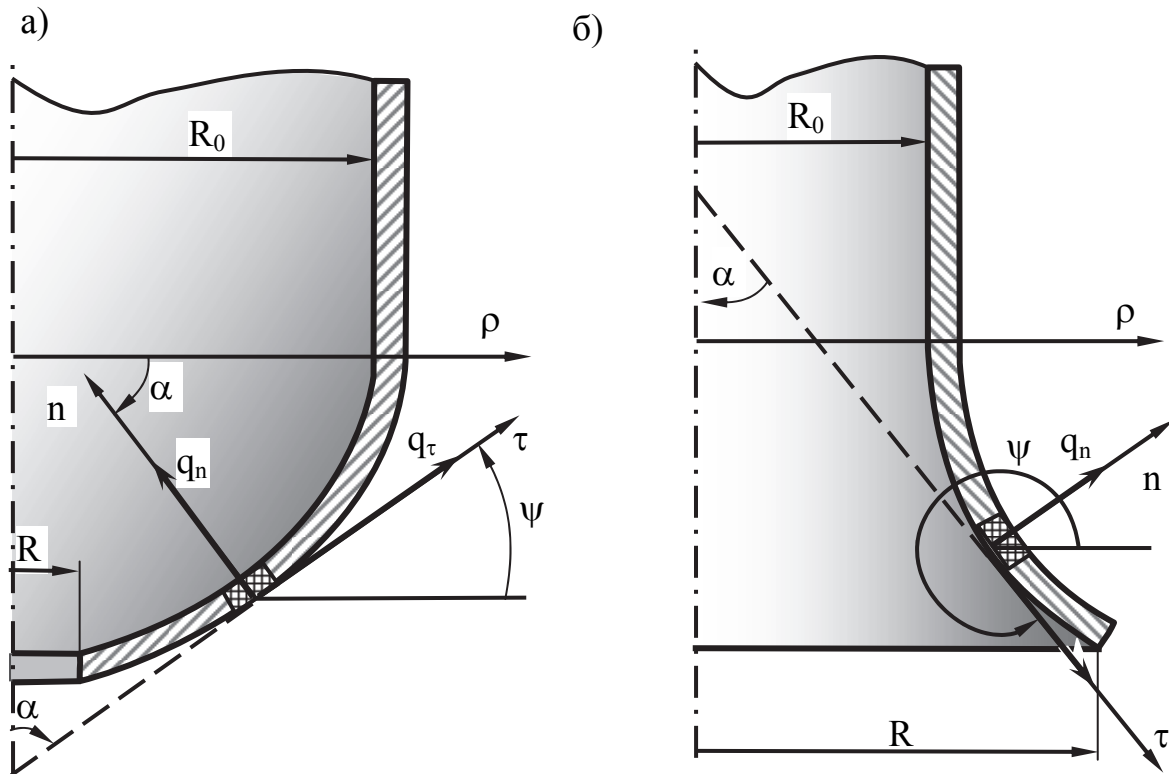


Рис. 4.1. Схема деформирования трубчатой заготовки:
а – обжим; б – раздача

Уравнения связи напряжений и истинных деформаций согласно методу переменных параметров упругости и деформационной теории, с учетом пренебрежения сжимаемостью материала и температурными деформациями, что справедливо при больших пластических деформациях, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} e_{\rho} &= \frac{1}{E_{сек}} \left(\sigma_{\rho} - \frac{1}{2} \sigma_{\varphi} \right); \\ e_{\varphi} &= \frac{1}{E_{сек}} \left(\sigma_{\varphi} - \frac{1}{2} \sigma_{\rho} \right); \\ e_z &= -\frac{1}{2E_{сек}} (\sigma_{\rho} + \sigma_{\varphi}), \end{aligned} \right\}$$

и

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\rho} &= \frac{4}{3} E_{сек} \left(e_{\rho} + \frac{1}{2} e_{\varphi} \right); \\ \sigma_{\varphi} &= \frac{4}{3} E_{сек} \left(e_{\varphi} + \frac{1}{2} e_{\rho} \right); \\ e_{\rho} + e_{\varphi} + e_z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Последнее уравнение системы (4.3) представляет собой условие постоянства объема.

4.3. Интегральные уравнения напряженно-деформированного состояния трубчатой заготовки

Используя уравнения равновесия (4.2) и уравнения связи напряжений с деформациями (4.3), для случая несжимаемости материала и отсутствия температурных деформаций получим интегральное уравнение равновесия в истинных деформациях .

$$e_{\rho} = -\frac{1}{2} \cdot e_{\varphi} + \frac{3}{4} \cdot \frac{U(\rho)}{S(\rho) \cdot E_{сек}} \cdot \int_R^{\rho} \frac{S(\rho) E_{сек} e_{\varphi} (1 + \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha)}{\rho \cdot U(\rho)} d\rho + \frac{E_{секR} \cdot S(R)}{E_{сек} \cdot S(\rho)} \cdot \left(e_{\rho R} + \frac{1}{2} e_{\varphi R} \right) \cdot U(\rho), \quad (4.4)$$

где

$$U(\rho) = \exp \left[- \int_R^{\rho} \frac{1 - \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha + 2\mu_{TP} \rho \frac{d\alpha}{d\rho}}{2\rho} d\rho \right]. \quad (4.5)$$

При анализе формоизменения трубчатой заготовки можно считать тангенциальные деформации известными:

$$e_{\varphi} = \ln \frac{\rho}{R_0}, \quad (4.6)$$

где R_0 – радиус заготовки (трубы).

Для определения граничных условий (рис. 4.2) необходимо учесть, что

$$E_{секR} \cdot \left(e_{\rho R} + \frac{1}{2} e_{\varphi R} \right) = \frac{3}{4} \sigma_{\rho R}.$$

В случае обжима и раздачи без подпора ($\sigma_{\rho R} = 0$) последнее слагаемое в уравнении (4.4) обращается в нуль.

При рассмотрении обжима и раздачи в конической матрице угол α равен углу конусности α_k . Тогда уравнение (4.5) упрощается:

$$U(\rho) = \exp \left[\frac{1 - \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha_k}{2} \cdot \ln \frac{R}{\rho} \right]. \quad (4.7)$$

Остановимся более подробно на случае обжима и раздачи в тороидальной матрице. При определенных условиях эти процессы можно рассматривать как выворот внутрь или наружу (рис. 4.2).

Выражая ρ через угол α , приведем уравнения (4.4) и (4.5) к виду:

$$e_\rho = -\frac{1}{2}e_\rho - \frac{3}{4} \frac{U(\alpha)}{E_{сек}S(\alpha)} \cdot \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{S(\alpha)E_{сек}e_\varphi r_0 (\sin \alpha + \mu_{TP} \cos \alpha)}{(r_0 \cos \alpha + a) \cdot U(\alpha)} d\alpha + \frac{E_{сек}\alpha_0 S(\alpha_0)}{E_{сек}S(\alpha)} \cdot \left(e_{\rho\alpha_0} + \frac{1}{2}e_{\varphi\alpha_0} \right) \cdot U(\alpha), \quad (4.8)$$

где

$$U(\alpha) = \exp \left[\int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{r_0 \sin \alpha - 3\mu_{TP}r_0 \cos \alpha - 2\mu_{TP}a}{2(r_0 \cos \alpha + a)} d\alpha \right]. \quad (4.9)$$

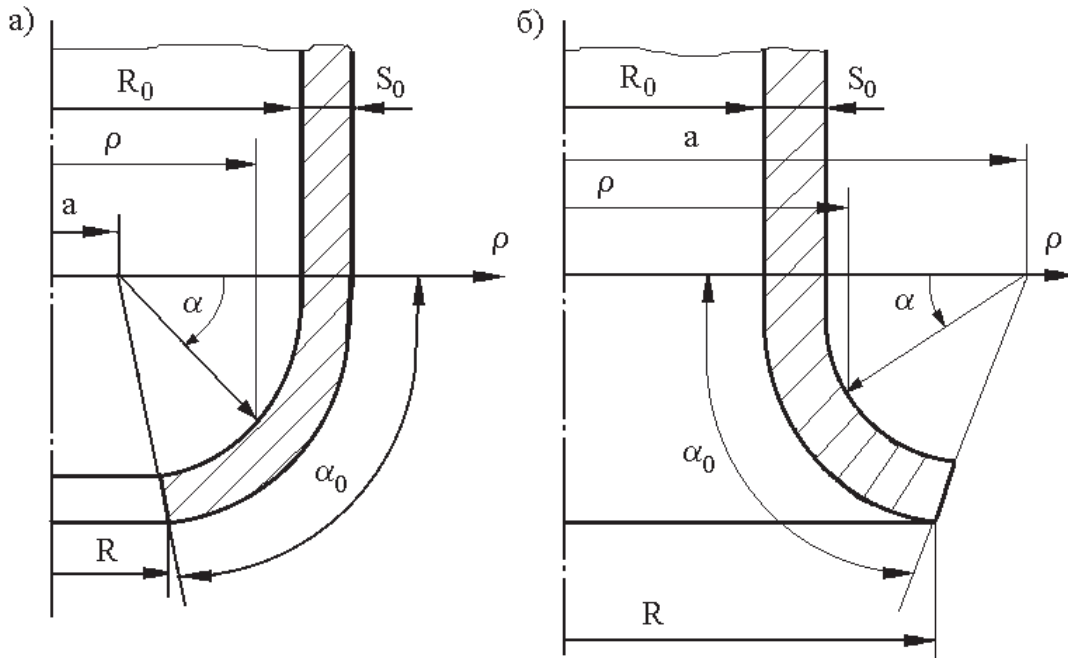


Рис. 4.2. Схема процессов обжима (а) и раздачи (б) в тороидальной матрице

Для обжима (выворота внутрь):

$$a = (R_0 - r_0), \quad e_\varphi = \ln \left[\frac{R_0 - r_0(1 - \cos \alpha)}{R_0} \right];$$

для раздачи (выворота наружу):

$$a = -(R_0 - r_0), \quad e_\varphi = \ln \left[\frac{R_0 + r_0(1 - \cos \alpha)}{R_0} \right].$$

Выражение (4.9) можно упростить:

$$U(\alpha) = \exp \left[\frac{1}{2} \ln \frac{r_0 \cos \alpha_0 + a}{r_0 \cos \alpha + a} + \frac{3}{2} \mu_{TP} (\alpha_0 - \alpha) + F(\alpha) \right], \quad (4.10)$$

где

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} a}{2} \cdot \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{r_0 \cos \alpha + a}.$$

В зависимости от соотношения между r_0 и a выражение $F(\alpha)$ будет иметь различный вид. Рассмотрим все случаи:

1) обжим в сферической матрице – $a = 0$:

$$F(\alpha) = 0;$$

2) обжим при $a^2 = r_0^2$, обжим при $a = r_0 = \frac{R_0}{2}$:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP}}{2} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right);$$

3) обжим при $a^2 < r_0^2$:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} \cdot a}{2\sqrt{r_0^2 - a^2}} \times \ln \left[\frac{\left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + a + r_0 \right) \left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} - a - r_0 \right)}{\left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - a - r_0 \right) \left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} + a + r_0 \right)} \right];$$

4) $a^2 > r_0^2$, выворот внутрь и наружу, все случаи раздачи:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} a}{\sqrt{a^2 - r_0^2}} \times \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right) \right].$$

При решении задач на выворот необходимо учесть, что для значений $\alpha = \pi$ или $\alpha_0 = \pi$

$$\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} \right) = \begin{cases} \pi/2, & \text{при } (a + r_0) > 0 \\ -\pi/2, & \text{при } (a + r_0) < 0. \end{cases}$$

При формоизменении трубчатых заготовок расчет значительно упрощается, так как тангенциальные деформации известны (4.6). Весь расчет деформированного состояния проводят с помощью уравнений (4.4) или (4.8).

Общий порядок решения этих уравнений представлен в следующем подразделе.

4.4. Порядок расчета технологических процессов формоизменения трубчатых заготовок. Сопоставление полученных результатов

При формоизменении трубчатых заготовок расчет упрощается, так как тангенциальные деформации известны (4.6). Весь расчет деформированного состояния проводят с помощью уравнений (4.4) или (4.8).

В первом приближении считают, что толщина заготовки постоянная и равна начальной толщине, а секущий модуль равен модулю Юнга.

Определяя $U(\rho)$ (4.5), (4.7) или $U(\alpha)$ (4.10), а также e_ρ (4.6), численно решают интегральные уравнения (4.4) или (4.8) для нахождения e_ρ .

После определения деформированного состояния определяют напряженное состояние и уточняют значения толщины и секущего модуля. Затем расчет повторяют снова до тех пор, пока значение секущего модуля последующего приближения не будет достаточно близко к предыдущему. Как показали расчеты, метод обладает хорошей сходимостью процесса последовательных приближений. Так, для достижения трехпроцентного расхождения значений секущего модуля необходимо провести от трех до восьми приближений в зависимости от уровня нагрузки.

Для проверки изложенной методики было проведено сопоставление с известными замкнутыми решениями при обжиге в конической матрице без нагрева. Результаты приведены на рис. 4.3.

Например, расхождение при определении радиального напряжения по предложенному методу и по теории пластического течения с учетом изменения толщины [18] составляет 4 % при трехпроцентной разности значений секущих модулей, тогда как расчет с использованием приближенного уравнения равновесия и линеаризованного условия пластичности дает заниженное значение радиальных напряжений на 22 %.

Таким образом, проведенное сопоставление показало, что результаты, получаемые по изложенной методике, хорошо согласуются с известными частными решениями, хотя возможности методики гораздо шире.

Было также проведено сопоставление расчетных к экспериментальным данным по обжигу с дифференцированным нагревом. Экспериментальные данные получены О.В. Поповым для обжига с подпором [20]. Как видно из рис. 4.4, результаты хорошо совпадают. Некоторое заниженное значение толщины на кромке у экспериментального графика объясняется тем, что при расчете не учитывалось влияние трения между кромкой и подпором.

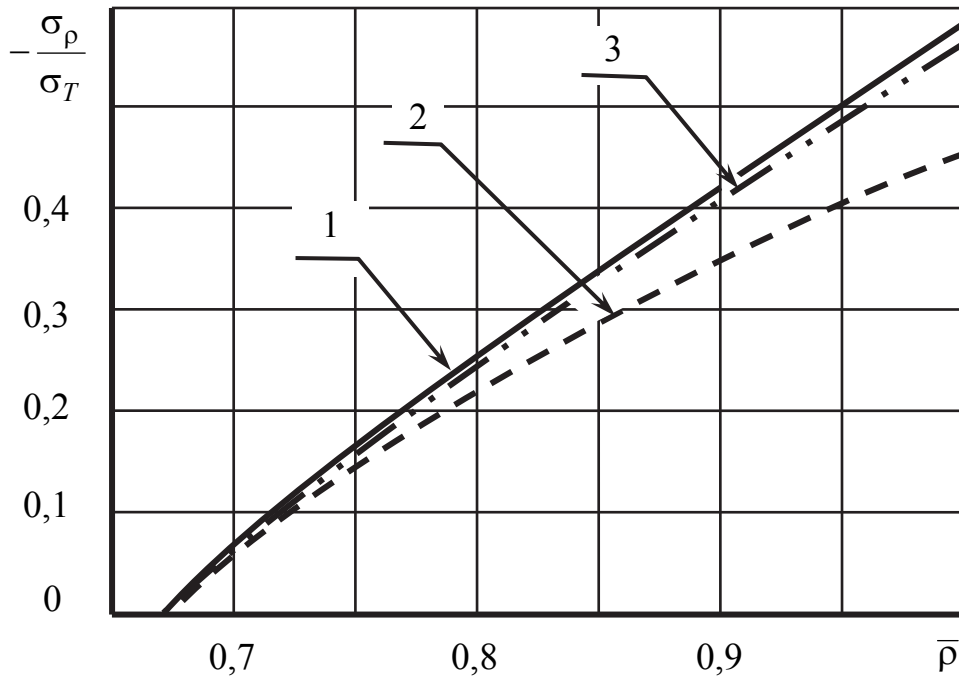


Рис. 4.3. Сравнительный анализ различных решений обжима в конической матрице без нагрева ($m_{об} = 0,67$):
 1 – теория течения с учётом изменения толщины; 2 – деформационная теория без учёта изменения толщины; 3 – разработанный метод

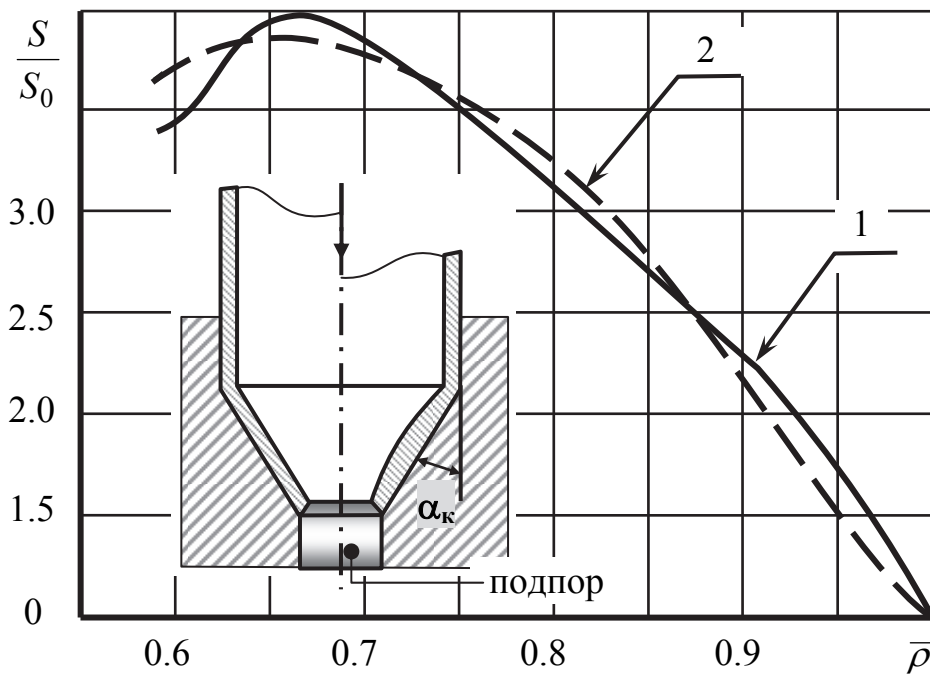


Рис. 4.4. Сопоставление экспериментальных и расчётных данных по процессу обжима с подпором и нагревом (материал АмГбМ, $\alpha_k = 12^\circ 30'$, $\mu_{тр} = 0,15$):
 1 – эксперимент; 2 – расчёт

5. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ СПОСОБЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

5.1. Современные прогрессивные технологии

Для повышения конкурентоспособности продукции необходимо внедрение в производство прогрессивных современных технологий. Их применение приводит к сокращению сроков освоения новых изделий, снижению себестоимости изготовления изделий и металлоемкости применяемой оснастки.

Актуальность разработки новых ресурсосберегающих процессов в перспективе повышается потому, что энергетическая стратегия развития отечественной промышленности определяет постоянное и долгосрочное повышение цен на энергоносители.

В связи с тем, что доля штампованных деталей в современном самолете может достигать до 70 %, важным становится вопрос о разработке и внедрении прогрессивных ресурсосберегающих процессов в заготовительно-штамповочное производство деталей самолета.

В этой связи представляется важной разработка и внедрение в производство прогрессивных технологий в области формоизменения трубчатых заготовок, поскольку детали из труб применяются практически во всех гидрогазовых системах летательных аппаратов.

Интерес представляют методы с применением ледяных стержней и энергии расширения воды при её заморозке, поскольку они обладают некоторыми конкурентными, по сравнению с другими прогрессивными методами, преимуществами: низкая энергоемкость методов по сравнению с электрогидравлической штамповкой; в отличие от штамповки эластичными и эластосыпучими средами, при которых наблюдается достаточно быстрое старение эластичного инструмента, у методов с применением льда подобный недостаток отсутствует; отсутствие больших затрат на изготовление эластичного инструмента и изготовление материала из которого он состоит.

Предлагаемые методы обработки металлов давлением, способные решить описанные проблемы, основаны на эффекте увеличения объема воды при замерзании, а также на применении предварительно замороженной воды в виде снега, либо ледяных стержней. Деформирующее усилие возникает либо в результате замерзания воды в замкнутом объеме, образованном деформируемой заготовкой и рабочей камерой, либо в результате использования льда или снега в качестве рабочего тела.

Эти методы можно отнести к энерго- и ресурсосберегающим технологиям, так как для процесса деформации не требуется больших затрат электроэнергии, дорогостоящего оборудования, сложной и высокоточной оснастки.

5.2. Использование возможностей воды при её замораживании для деформирования трубчатых заготовок

Одним из прогрессивных методов формоизменения трубчатых заготовок является метод с использованием эффекта увеличения объёма воды при её замерзании.

Штамп для раздачи тонкостенных трубчатых заготовок состоит из цилиндрического корпуса 3 с крышками 2 и 7, разъёмной матрицы 6 (рис. 5.1).

Цилиндрический корпус штампа 3 и разъёмная матрица 6 устанавливаются на нижней крышке 7. Затем внутрь матрицы устанавливают трубчатую заготовку 9, которую заполняют водой 10. Затем штамп закрывается верхней крышкой 2. Собранный штамп помещается в морозильную камеру. При замерзании объём воды начнёт увеличиваться и образующийся лёд 4 деформирует трубчатую заготовку в готовое изделие 5.

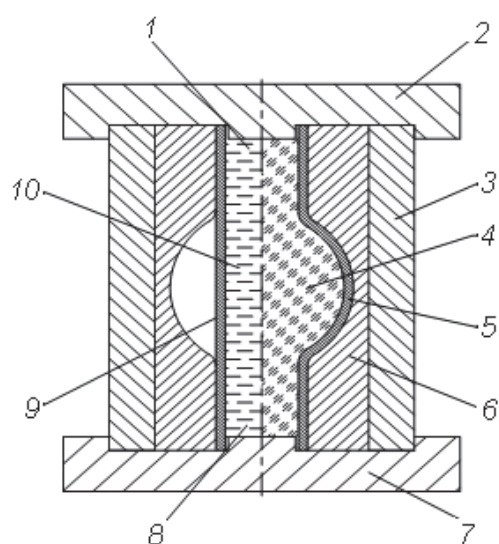


Рис. 5.1. Штамп для раздачи трубчатой заготовки с использованием энергии расширения воды при её заморозке

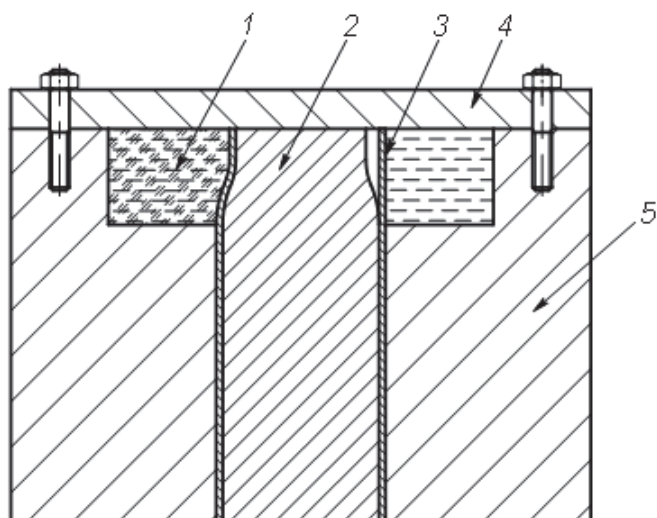


Рис. 5.2. Штамп для обжима трубчатой заготовки с использованием энергии расширения воды при её заморозке

Штамп для обжима тонкостенных трубчатых заготовок (рис. 5.2) состоит из корпуса 5, прижимной крышки 4 и съёмной матрицы 2.

В корпус штампа вставляется трубчатая заготовка 3 с матрицей 2. В образовавшуюся полость между корпусом и заготовкой заливается вода и устанавливается крышка 4. Собранный штамп помещается в морозильную камеру. При замерзании объём воды увеличивается, и образующийся лёд 1 деформирует трубчатую заготовку.

Метод формоизменения труб с использованием эффекта увеличения объема воды при её замерзании можно отнести к энерго- и ресурсосберегающим, так как для процесса деформации не требуется больших затрат электроэнергии, дорогостоящего оборудования, сложной и высокоточной оснастки.

5.3. Формообразование элементов трубопроводов с использованием стержней из снега и льда

На сегодняшний день наиболее распространены способы деформирования трубчатых заготовок эластичными и эластосыпучими средами. Основными недостатками этого процесса являются затраты на изготовление эластичного инструмента, затраты энергии на сжатие эластичной среды, а также достаточно быстрый износ эластичного инструмента, что ведет к его частой замене. В связи с этим особенно актуальной становится проблема разработки ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих сокращение описанных затрат. Например, в качестве рабочих тел могут быть использованы наполнители из снега или льда.

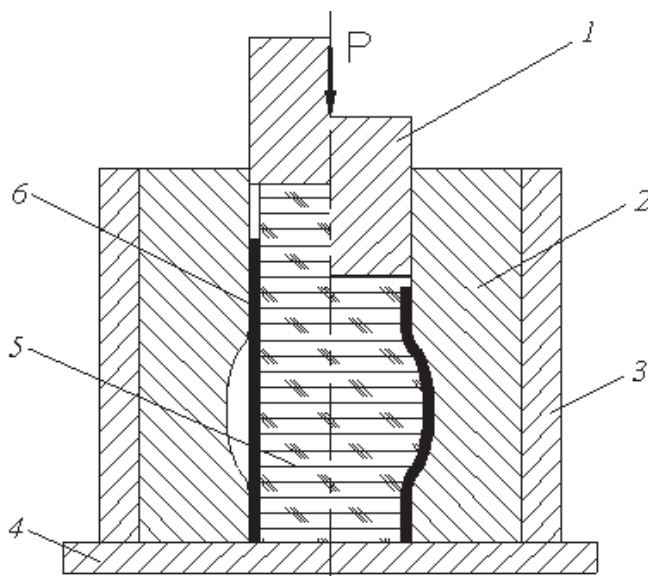


Рис. 5.3 Штамп для раздачи трубчатой заготовки с использованием стержня из льда или снега

Предлагаемый штамп для раздачи трубчатой заготовки с использованием ледяного стержня (рис. 5.3) состоит из разъемной матрицы 2, установленной в жестком корпусе, состоящем из плиты основания 4 и наружной обоймы 3, и пуансона 1. В матрице 2 размещена трубчатая заготовка 6, внутри которой находится рабочее тело 5, выполненное из спрессованного снега или стержня льда.

В подготовленную матрицу 2 вставляют трубчатую заготовку 6, затем внутри размещают рабочее тело 5. Посредством перемещения ползуна пресса с усилием P перемещается пуансон 1. От пуансона 1 усилие P передается через рабочее тело в зону деформирования трубчатой заготовки, в результате чего происходит раздача трубы. Затем пуансон 1 поднимают вверх, производят разборку матрицы 2 и выемку готовой детали с рабочим телом 5, которое впоследствии растаивает за счет положительной температуры рабочего помещения.

На рис. 5.4 представлена схема штампа для обжима трубчатой заготовки с использованием ледяного стержня. Штамп состоит из неразъемной матрицы 4 и пуансона 1.

Штамп работает следующим образом. В подготовленную матрицу 4 сверху устанавливают трубчатую заготовку 2, внутри которой размещено рабочее тело 3, выполненное из ледяного стержня. Посредством перемещения ползуна прессы с усилием P (на рисунке не показан) перемещается пуансон 1, в результате чего происходит обжим трубы. Затем пуансон 1 поднимают вверх, производят выемку готовой детали с рабочим телом 3, которое впоследствии растает за счет положительной температуры рабочего помещения.

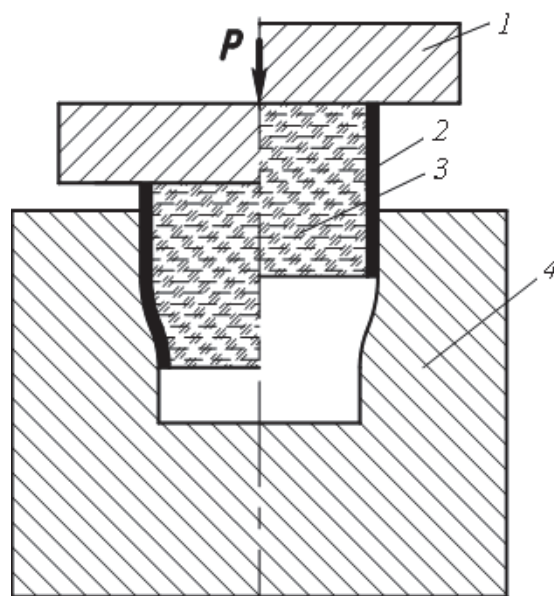


Рис. 5.4. Штамп для обжима трубчатой заготовки с использованием ледяного стержня

5.4. Проведение эксперимента по формообразованию трубчатых заготовок

Для проведения эксперимента использовались заготовки труб (рис. 5.5) с техническими характеристиками:

- марка металла Д16;
- внутренний диаметр 25 мм;
- наружный диаметр 28 мм;
- толщина стенки 1,5 мм;
- длина заготовки 100 мм.

Параметры матрицы (см. рис. 5.6):

- ширина матрицы 82 мм;
- длина матрицы 94 мм;
- толщина матрицы 34 мм;
- диаметр ручейка матрицы 36,75 мм.

После помещения заготовки в матрицу (рис. 5.6) последняя зажималась при помощи специального бандаж. Для концентрации деформаций заготовки в области ручья матрицы на концы заготовки одевались шайбы (рис. 5.7).

Собранная конструкция погружалась в воду, после чего в подводном положении торцы заготовки заглушались бандажом с полиэтиленовыми

прокладками (рис. 5.8) с целью устранения возможной утечки наполнителя из-за недостаточной герметичности сборки конструкции.



Рис. 5.5. Заготовки, использованные в серии экспериментов



Рис. 5.6. Матрица в разобранном виде

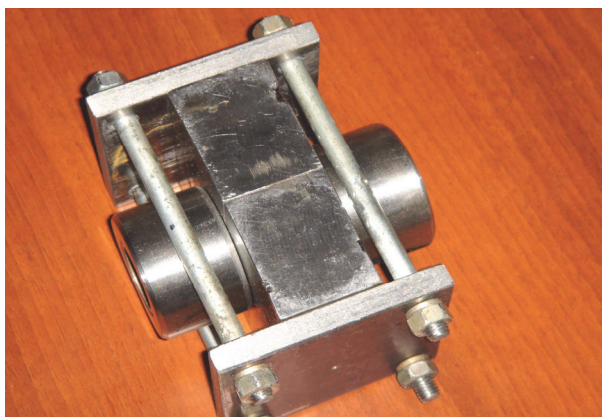


Рис. 5.7. Установка на концы заготовки торцевых шайб

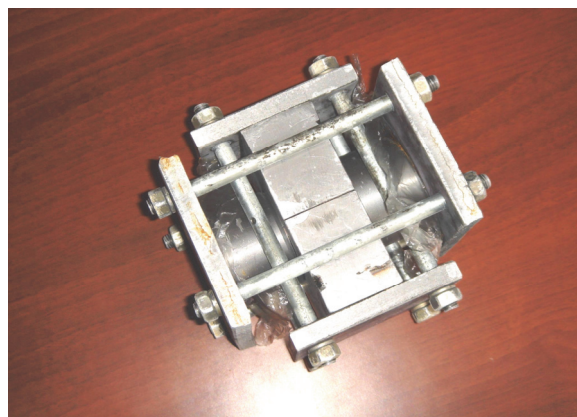


Рис. 5.8. Собранная конструкция для экспериментальных исследований

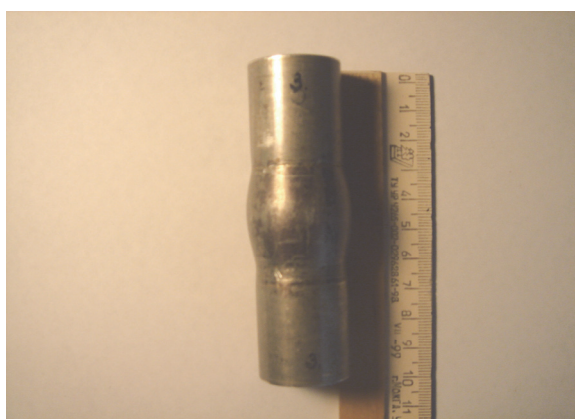


Рис. 5.9. Деформация заготовки

Экспериментальная установка помещалась в морозильную камеру с температурой $-19\dots-20$ °C на различные периоды времени.

Выполненные эксперименты по исследованию возможностей использования льда в качестве рабочего тела при зиговке трубных заготовок показали только возможность такого нетрадиционного применения льда. Результаты этой серии опытов говорят о необходимости дальнейших более глубоких исследований в этом направлении. Для разработки реальной технологии следует изучить влияние температурных и временных режимов, химического состава льда, наличия и концентрации демпфирующих добавок, цикличности (неоднократности) нагружения заготовок и других характеристик на закономерности их деформирования.

6. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

6.1. Программа конечно-элементного анализа QForm

Современный зарубежный рынок программ конечно-элементного анализа процессов кузнечно-штамповочной промышленности представлен не так широко. В качестве примеров можно привести лишь несколько программ:

- **VeraCAD** (разработчик – Eratz Ingenieur Buro (Германия) – простая в использовании система автоматизированного проектирования, предназначенная для построения калибров и расчёта параметров технологического процесса вальцовки, имеется возможность экспорта чертежей и трёхмерных моделей инструментов;

- **Matilda** (разработчик – компания GMS Bernau (Германия) – программа, позволяющая моделировать термообработку и формировать микроструктуру;

- **THERMPROF** (разработчик – компания АВР (Германия) – программа позволяющая рассчитывать режим индукционного нагрева заготовки по ее параметрам, необходимую производительность и время нагрева в индукторе;

- **QForm 2D/3D** (разработчик – фирма «КванторФорм» (Россия) – программный комплекс для моделирования и оптимизации процессов обработки металлов давлением. Программа основана на методе конечных элементов.

Особый интерес представляет отечественная программа QForm 2D/3D, поскольку она отвечает самым высоким требованиям в области моделирования процессов кузнечно-штамповочной промышленности. Моделирование легко выполняется для всей технологической цепочки, состоя-

щей из таких операций, как управляемый нагрев, формоизменение, обрезка и охлаждение.

Помимо вычислений температуры, напряжений и деформаций программа может рассчитывать процессы рекристаллизации и изменения размера зерен. Возможен расчёт операций для предсказания свойств поковки. Программа легка в освоении и не требует специальной подготовки кроме практического опыта в области технологии обработки давлением, что обеспечивает снижение временных затрат на разработку новых и оптимизацию существующих технологических процессов. QForm легко может применяться на средних и малых предприятиях благодаря простому интерфейсу, быстрой подготовке исходных данных и полностью автоматическому расчёту.

В течение многих лет QForm применяется на многих штамповочных предприятиях в Европе, Азии и Америке. Из-за необходимости расчёта как предварительных, так и окончательных операций технологической цепочки в QForm были добавлены возможности по расчёту таких операций, как индукционный нагрев и предсказание конечной формы и свойств детали после термообработки. Работы выполнялись совместно с другими разработчиками промышленного программного обеспечения, были проведены объединения их продуктов с QForm. Такое комплексное программное обеспечение значительно расширяет возможности использования QForm для расчёта ковочных и штамповочных технологических цепочек. Самой первой программой, с которой сложились партнёрские отношения, была система VeraCad.

Программа VeraCad обеспечивает автоматическую разработку переходов вальцовки и формы ковочных валльц, после чего становится возможным моделирование и оптимизация процесса в QForm.

Моделирование термообработки и формирования микроструктуры стали доступны в программе QForm благодаря сотрудничеству с компанией GMS Bernau (Германия). Разработанная ими программа Matilda была встроена в QForm.

В сотрудничестве с компанией АВР (Германия) был разработан интерфейс взаимодействия между программами QForm и THERMPROF. Программа THERMPROF рассчитывает режим индукционного нагрева заготовки по её параметрам, необходимую производительность и время нагрева в индукторе АВР. Результаты моделирования THERMPROF импортируются в программу QForm для моделирования деформации с использованием реального распределения температуры в заготовке после индукционного нагрева.

С точки зрения российских пользователей программа QForm является удобным инструментом моделирования процессовковки и штамповки, что обеспечивает быстрое возвращение инвестиций путём ускорения

проектирования технологий и сокращения издержек производства. Программа QForm постоянно наращивает возможности моделирования и имеет конкурентоспособные преимущества. Все совершенствования, новые возможности и модули расчёта программы направлены на экономию затрат предприятий, которые её используют [27].

6.2. Подготовка 3D-моделей

Программа QForm позволяет моделировать процессы обжима и раздачи трубчатых заготовок в специализированных оснастках. Для проведения моделирования необходимо подготовить 3D-модели штампов и трубчатых заготовок. Процесс моделирования можно провести практически в любой имеющейся системе твердотельного моделирования. В качестве самых распространенных систем твердотельного моделирования можно указать следующие:

- NX (ранее Unigraphics или UG) – флагманская CAD/CAM/CAE – система от компании Siemens PLM Software. Программа использует ядро геометрического моделирования Parasolid;
- CATIA – система автоматизированного проектирования (САПР) французской фирмы Dassault Systèmes.
- Pro/ENGINEER – система автоматизированного проектирования от Parametric Technology Corporation.
- T-FLEX CAD — САПР, разработанная российской компанией «Топ Системы» с возможностями параметрического моделирования. Система работает на основе геометрического ядра Parasolid.

Используем систему NX для разработки твердотельных моделей оснастки и трубчатых заготовок (представленные рис. 6.1 – 6.5. выполнены с помощью системы T-FLEX CAD).

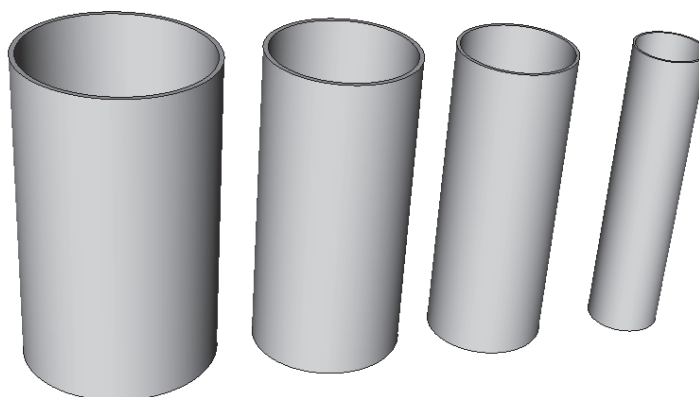


Рис. 6.1. Твердотельные модели трубчатых заготовок различных диаметров и толщин

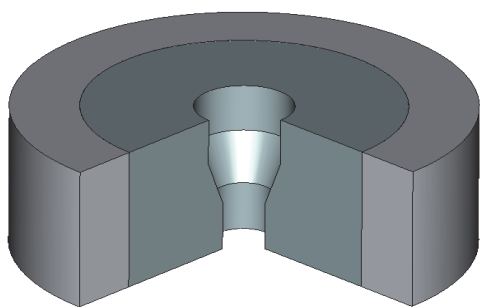


Рис. 6.2. 3D-параметрическая модель оснастки для обжима

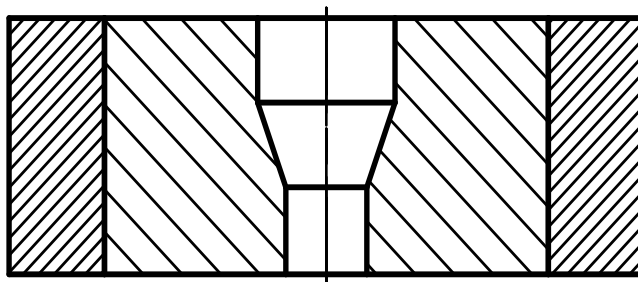


Рис. 6.3. 2D-параметрическая модель оснастки для обжима

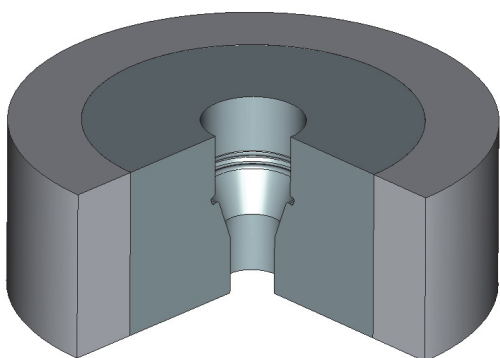


Рис. 6.4. 3D-параметрическая модель оснастки для обжима с канавкой

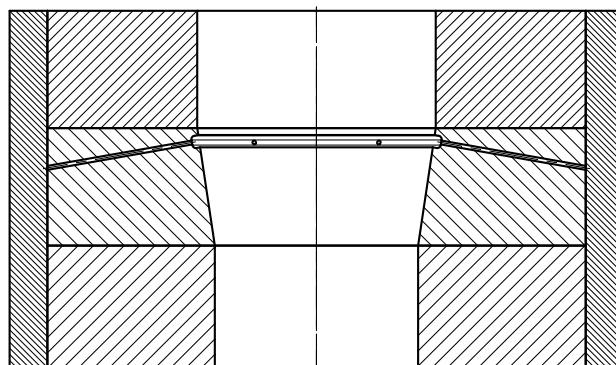


Рис. 6.5. 2D-параметрическая модель оснастки для обжима с канавкой

Разработанные твердотельные модели необходимо экспортировать в формат STEP A203/214 3D (*.stp, *.step) и в ходе дальнейшей работы импортировать в систему QForm.

6.3. Работа постпроцессора и конечно-элементный анализ

Несмотря на то что программа QForm основана на методе конечных элементов (ядро системы), в ней нет никакого жесткого разделения системы на препроцессоры и постпроцессоры. Визуализация процессов формоизменения происходит одновременно с расчетом, что позволяет немедленно интерпретировать получаемые результаты и вносить в технологию необходимые изменения.

Программа с успехом позволяет решать задачи моделирования и оптимизации процессов штамповки: определять силовые и энергетические параметры, производить расчеты кинематики течения металла и температурных полей, исследовать напряженно-деформированное состояние заготовки и инструмента. Полученные в результате расчетов данные создают

основу для выявления и последующего учета технологической наследственности материала.

Структура главного окна программы QForm показана на рис. 6.6.

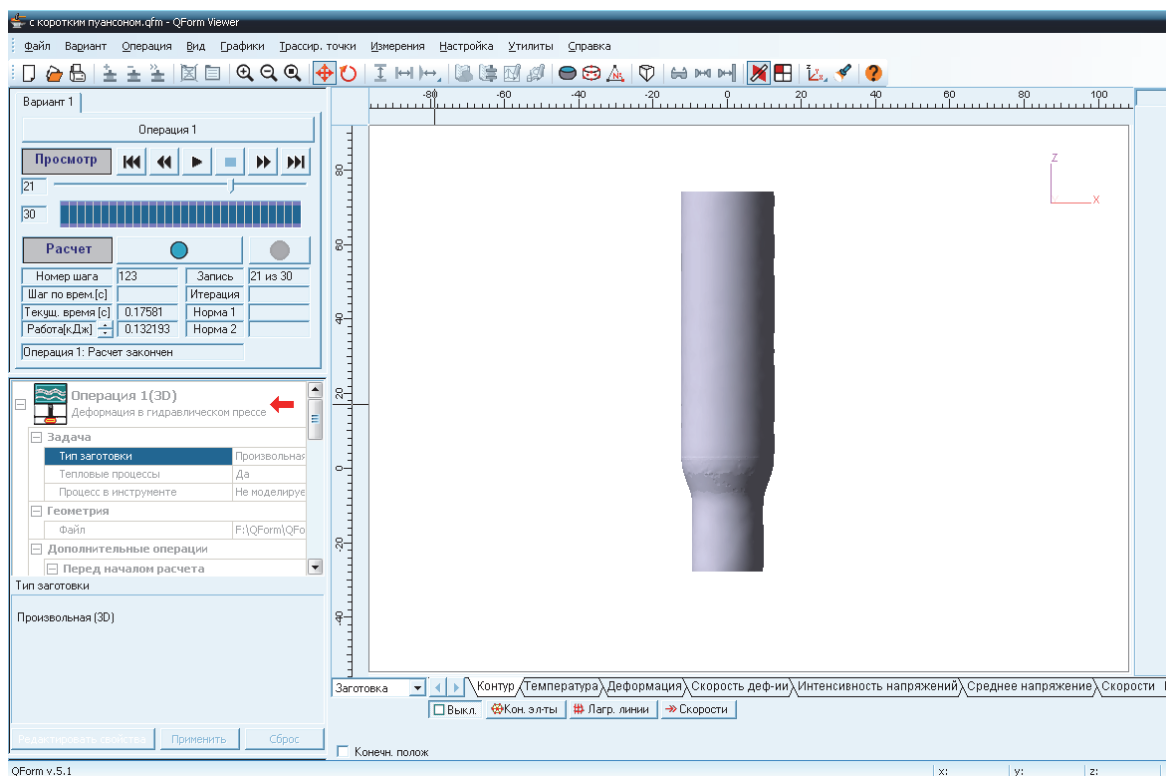


Рис. 6.6. Структура главного окна программы QForm.

Исходные данные для расчета в общем виде отражены на рис. 6.7.

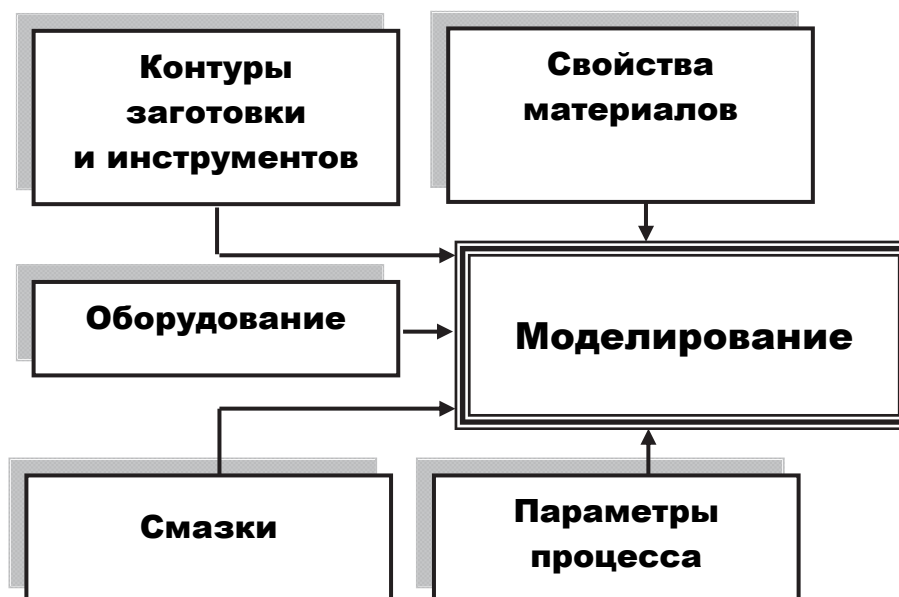


Рис. 6.7. Состав исходных данных для моделирования

После расчета можно увидеть в окне просмотра результаты текущее состояние моделирования. Клавиши на панели управления просмотром обеспечивают просмотр в заготовке векторов скоростей, полей температур, напряжений, деформаций и скоростей деформаций, деформированной делительной (лагранжевой) сетки, а также конечно-элементной сетки. Например, нажав закладку «Интенсивность напряжений», можно видеть заголовков активного объекта «Заготовка», разметку поля интенсивности напряжений.

Панель прокрутки похожа на магнитофон. Можно просматривать результаты моделирования, перемещаясь по записям файла. Для этого необходимо нажать кнопку передвижения по файлу с записью.

На рис. 6.8 показаны форма в сечении и размеры детали после формообразования, рассчитанные программным комплексом QForm.

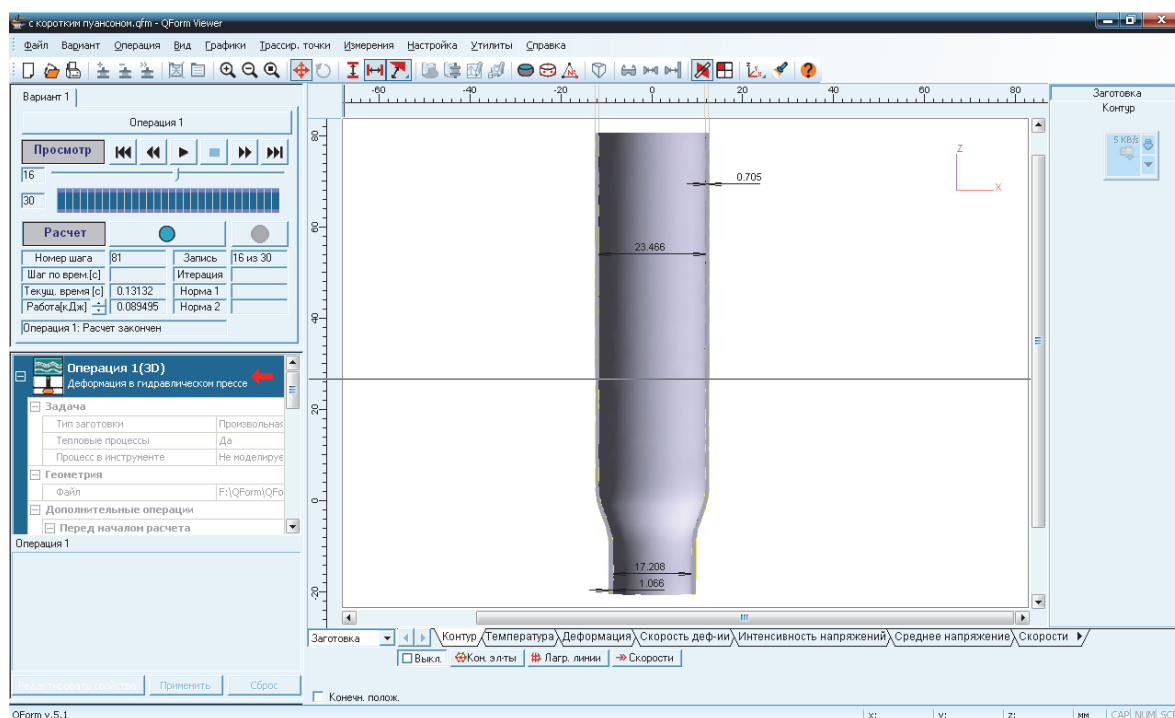


Рис. 6.8. Изменение формы геометрии после обжима трубчатой заготовки.

В результате пластической деформации, особенно холодной, материалом наследуется (запоминается) неравномерное упрочнение и неоднородность свойств по объему штампованных изделий, которые являются причиной возникновения остаточных напряжений. Остаточные напряжения могут повысить или понизить прочность изделия, если оно не подвергается термической обработке после холодного пластического деформирования. Неоднородность свойств обусловлена в первую очередь неравно-

мерным распределением накопленной деформации, расчет которой в обычной технологической практике затруднен.

На рис. 6.9. показано распределение интенсивности напряжений в процессе деформирования.

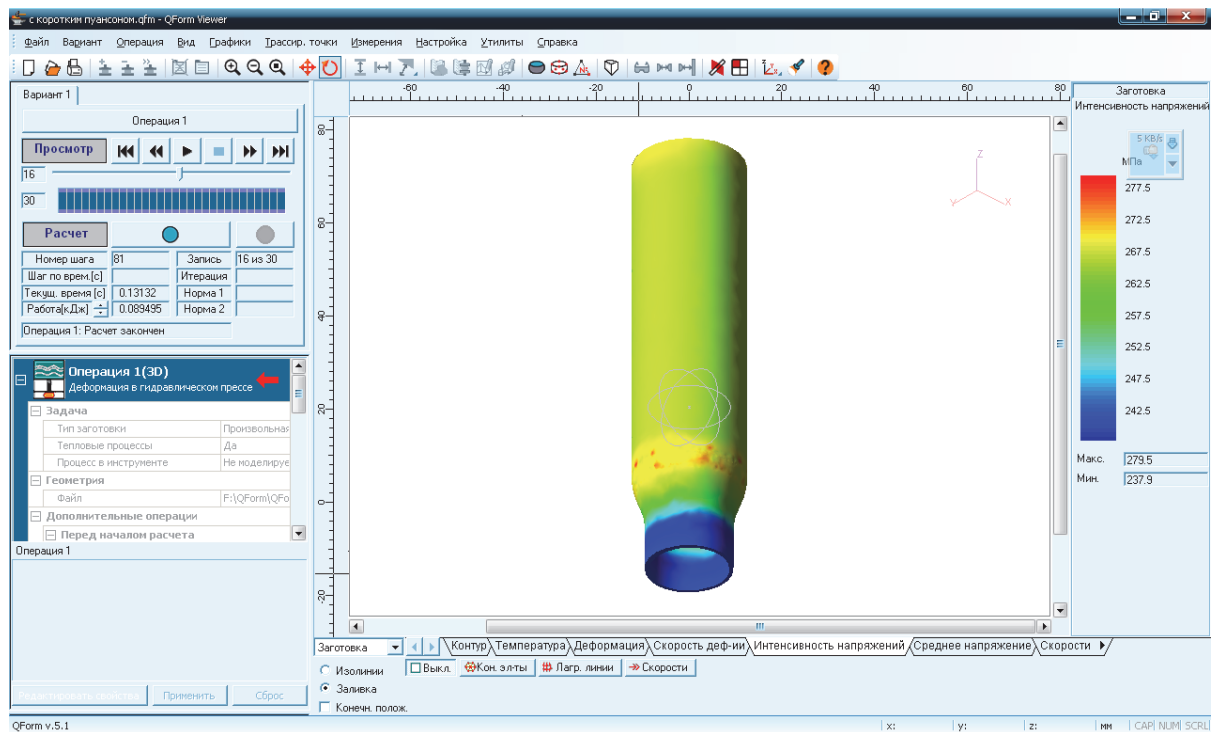


Рис. 6.9. Распределение интенсивности напряжений в процессе деформирования

В процессах холодной объемной и листовой штамповки возможности пластического формоизменения металлов ограничены. Очень часто деформации, необходимые для получения изделий требуемой формы, превышают пластичность материала – степень деформации, при которой образуется трещина в условиях данной механической схемы деформации. Развитие техники сопровождается созданием новых конструкционных материалов, при деформации которых даже в горячем состоянии возникает вероятность разрушения. Поэтому необходимо на этапе проектирования технологических процессов установить, выдержит ли материал проектируемую операцию, что приведет к интенсификации процессов ОМД, а также значительной экономии, связанной с уменьшением объема производственных экспериментов по отладке процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пособии приведены сведения, необходимые для разработки технологических процессов изготовления элементов гидрогазовых систем летательных аппаратов. Дано общее представление о назначении и конструкции элементов трубопроводов. Обобщен опыт проектирования и изготовления трубопроводных коммуникаций.

Рассмотрены вопросы технологической подготовки и организации производства гидрогазовых систем. Рассмотрены основные операции формообразования труб. Приведены характеристики современных трубогибочных станков, специализированных прессов, инструмента и оснастки для проведения основных формообразующих операций, а также устройств для испытаний трубопроводов. Рассмотрены вопросы математического моделирования технологических процессов формоизменения трубчатых заготовок, описаны ресурсосберегающие технологии и приведены данные экспериментов. Приведены сведения о конечно-элементном моделировании процессов формообразования трубчатых заготовок при помощи современных компьютерных программ.

Учебное пособие может быть рекомендовано для изучения студентами специальности 160100 «Самолето- и вертолетостроение» всех форм обучения при выполнении лабораторного практикума, контрольных работ и при подготовке к экзамену.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какую функцию в летательных аппаратах выполняют трубопроводные магистрали?
2. Какие материалы применяются для изготовления элементов трубопроводов?
3. Какова схема классификации основных групп и типов соединений трубопроводов и патрубков?
4. Опишите основные способы отрезки труб.
5. В чем суть процесса развальцовки труб?
6. Опишите принцип действия труборазвальцовочного станка.
7. Перечислите основные способы гибки труб.
8. Опишите принцип действия трубогибочного станка.
9. Перечислите основные элементы трубопровода и способы их изготовления.
10. В чем суть процессов обжима и раздачи трубных заготовок?
11. Перечислите основные способы калибровки концов труб.
12. Какое оборудование используется для зиговки концов труб?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аверкиев, Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Галкин, М. Н. Основы теплообмена : учеб. пособие / М. Н. Галкин. – М. : Изд-во МАТИ, 1970. – 159 с.
3. Газогазовые системы летательных аппаратов / Б. Н. Марьин, С. Б. Марьин, Д. Г. Колыхалов, С. И. Феоктистов [и др.]. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – 459 с.
4. Горбунов, М. Н. Технология заготовительных работ в производстве летательных аппаратов / М. Н. Горбунов. – М. : Машиностроение, 1970. – 351 с.
5. Горбунов, М. Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов / М. Н. Горбунов. – М. : Машиностроение, 1981. – 224 с.
6. Григорьев, А. С. Большие деформации неоднородных осесимметричных оболочек / А. С. Григорьев // Труды VIII Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин. – Ростов-на-Дону, 1971. – С. 119-125.
7. Громова, А. Н. Изготовление деталей из листа и профилей при серийном производстве / А. Н. Громова, В. И. Завьялова, В. К. Коробов. – М. : ОБОРОНГИЗ, 1960. – 340 с.
8. Грошиков, А. И. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении / А. И. Грошиков, В. А. Малафеев. – М. : Машиностроение, 1976. – 440 с.
9. Ершов, В. И. Совершенствование формообразующих операций листовой штамповки / В. И. Ершов, В. И. Глазков, М. Ф. Каширин. – М. : Машиностроение, 1990. – 311 с.
10. Изготовление трубопроводов гидрогазовых систем летательных аппаратов / Б. Н. Марьин, В. М. Сапожников, Ю. Л. Иванов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1998. – 400 с.
11. Интенсификация формообразования деталей из трубчатых заготовок / Б. Н. Марьин, Ю. Л. Иванов, В. М. Сапожников [и др.] ; под общ. ред. Б. Н. Марьина. – М. : Машиностроение, 1996. – 176 с.
12. Исаченков, Е. И. Штамповка резиной и жидкостью / Е. И. Исаченков. – М. : Машиностроение, 1967. – 367 с.
13. Катков, В. Ф. Оборудование и средства автоматизации и механизации заготовительно-штамповочных цехов / В.Ф. Катков. – М. : Машиностроение, 1985. – 384 с.
14. Колыхалов, Д. Г. Моделирование процесса обжима полых и трубчатых заготовок при использовании ледяных стержней в качестве рабочего тела / Д. Г. Колыхалов, Б. Н. Марьин, С. И. Феоктистов, Р. В. Шпорт //

Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1 (8). – С.78-85.

15. Колыхалов, Д. Г. Прогрессивные способы изготовления трубопроводов летательных аппаратов / Д. Г. Колыхалов, С. Б. Марьин, Б. И. Долотов, В. И. Якимов, А. В. Жабаров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2012, № II-1 (10). - С. 4-10.

16. Колыхалов, Д.Г. Производство листовых штампованных деталей летательных аппаратов с использованием ресурсосберегающих технологий/ Д.Г. Колыхалов, С.Б. Марьин, Б.И. Долотов, В.И. Якимов, А.В. Жабаров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № II-1 (10). – С.11-15.

17. Листовая штамповка // Ковка, штамповка : справочник / под ред. А. Д. Матвеева. – М. : Машиностроение, 1987. – Т. 4. – 554 с.

18. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести/ Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1975. – 399 с.

19. Мошнин, Е. Н. Гибка и правка на ротационных машинах / Е. Н. Мошнин. – М. : Машиностроение, 1967. – 271 с.

20. Попов, О. В. Изготовление цельноштампованных тонкостенных деталей переменного сечения / О. В. Попов. – М. : Машиностроение, 1974. – 120 с.

21. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.

22. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / под общ. ред. А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1985. – 184 с.

23. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – М. : Машиностроение, 1965. – 788 с.

24. Соколовский, В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М. : Высш. шк., 1969. – 608 с.

25. Шпорт, В. И. Экспериментальные исследования возможностей использования воды при ее замораживании для деформирования заготовок / В. И. Шпорт, В. М. Козин, Б. Н. Марьин, В. И. Одинокоев, А. И. Евстигнеев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № I-1(1). – С. 99-109.

26. Патент на полезную модель. Устройство для испытания трубной заготовки / Д.Г. Колыхалов, Б.Н. Марьин, С.Б. Марьин и др. – Заявка №2012121722/28, от 25.05.2012.

27. QForm – универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки [Электронный ресурс]/ сост.: Н. В. Биба, С. А. Стебунов, Ю. А. Гладков, П. С. Мордвинцев ; ООО «КванторФорм», г. Москва. URL: http://qform3d.ru/db_files/326/1394.pdf (дата обращения 22.02.2013).