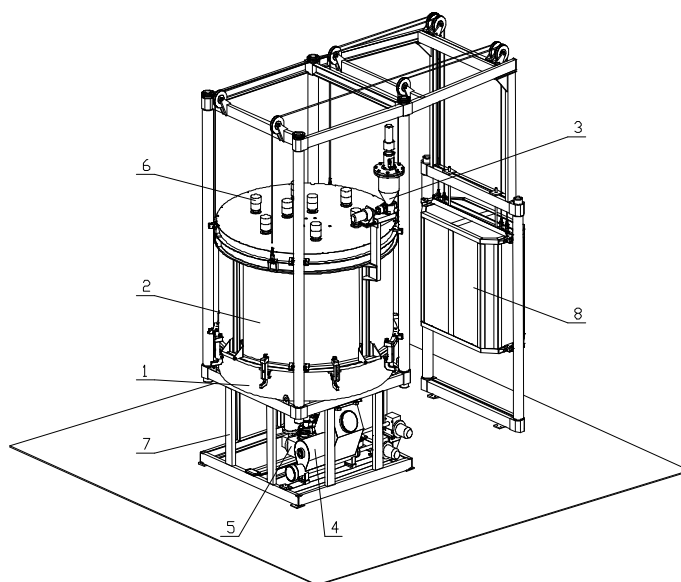


А.Г. ТКАЧЕВ, И.Н. ШУБИН, А.И. ПОПОВ

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ.  
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ  
НАНОИНДУСТРИИ И ТЕХНОЛОГИЯ  
ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ**



Тамбов  
◆Издательство ГОУ ВПО ТГТУ◆  
2010

УДК 66:621:002.51  
ББК Ж60я73  
Т484

**Рецензенты:**

Главный конструктор химического и нефтяного аппаратостроения ОАО «Тамбовский завод "Комсомолец" им. Н.С. Артёмова»  
*И.В. Бесперстов*

Инженер-конструктор ОАО «Тамбовский завод "Комсомолец" им. Н.С. Артёмова», кандидат технических наук  
*М.П. Мариковская*

Заведующий лабораторией Отдела химии и новых химических технологий ОАО «Корпорация «Росхимзащита», кандидат химических наук  
*М.А. Ульянова*

**Ткачев, А.Г.**

Т484

Промышленные технологии и инновации. Оборудование для nanoиндустрии и технология его изготовления : учебное пособие / А.Г. Ткачев, И.Н. Шубин, А.И. Попов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 132 с. – 300 экз. –

ISBN 978-5-8265-0962-3.

Рассмотрены физико-химические основы технологий nanoиндустрии, приведены характеристики перспективных материалов – нанотрубок и нановолокон, описано оборудование для получения наноматериалов, показана технологическая схема и аппаратура опытно-промышленного производства УНМ «Таунит», дано представление об основных технологических процессах аппаратостроения для nanoиндустрии.

Рекомендуется для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование», «Инноватика». Может быть использовано при обучении студентов других направлений и специальностей в области техники и технологии, а также научными работниками, аспирантами, при повышении квалификации преподавателей вузов.

УДК 66:621:002.51  
ББК Ж60я73

ISBN 978-5-8265-0962-3

© Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Тамбовский государственный технический университет (ГОУ ВПО ТГТУ), 2010

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Тамбовский государственный технический университет

**А.Г. ТКАЧЕВ, И.Н. ШУБИН, А.И. ПОПОВ**

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И  
ИННОВАЦИИ.  
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНОИНДУСТРИИ  
И ТЕХНОЛОГИЯ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование»



---

Тамбов  
Издательство ГОУ ВПО ТГТУ  
2010

Учебное издание

ТКАЧЕВ Алексей Григорьевич,  
ШУБИН Игорь Николаевич,  
ПОПОВ Андрей Иванович

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ.  
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ  
НАНОИНДУСТРИИ И  
ТЕХНОЛОГИЯ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

Учебное пособие

Редактор Л.В. Комбарова  
Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Подписано в печать 15.04.2010  
Формат 60 × 84/16. 7,67 усл. печ. л. Тираж 300 экз. Заказ № 230

Издательско-полиграфический центр ГОУ ВПО ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

---

Становление инновационной экономики России предопределяется динамикой научно-технического прогресса, необходимостью разработки и внедрения наукоёмких технологий во всех сферах народного хозяйства. При этом развитие производственного сектора страны должно осуществляться путём непрерывного и целенаправленного процесса улучшений, модернизации, нововведений, обеспечивающих повышение качества товаров и услуг.

**Ведущая роль в интенсивном развитии экономики принадлежит качественно новым промышленным технологиям, обеспечивающим многократное повышение производительности оборудования и появление материалов с новыми свойствами и возможностями их применения.**

Цель пособия – ознакомить обучающихся с перспективными направлениями совершенствования производства с использованием достижений нанотехнологии; развить их способности разрабатывать проекты реализации инноваций на предприятиях, использующих нанопродукты и нанотехнологии, а также на машиностроительных предприятиях, изготавливающих оборудование как для развивающейся nanoиндустрии, так и для действующих предприятий химической и нефтеперерабатывающей промышленности.

В процессе подготовки специалистов в области техники и технологии использование пособия позволяет более эффективно решать следующие педагогические задачи: формирование осознанной нацеленности на использование достижений нанотехнологий в промышленности; приобретение обучающимися знаний об используемом в nanoиндустрии оборудовании и аппаратах; знакомство студентов с технологией изготовления частей оборудования для производства нанопродуктов на предприятиях аппаратостроения; формирование умений организовывать собственную производственно-технологическую деятельность при реализации инновационных проектов.

Материал учебного пособия изложен так, что им можно пользоваться при организации обучения по полной и сокращённым программам других специальностей и направлений подготовки, относящихся к Учебно-методическому объединению вузов по университетскому политехническому образованию.

В содержательном плане в пособии изложены краткие сведения по классификации нанопродуктов и перспективах их использовании в промышленности, приведены существующие в настоящий момент способы и аппараты для их получения, рассмотрена технологическая схема промышленного получения углеродного наноматериала «Таунит». Большое внимание в пособии уделено изучению технологии получения отдельных деталей и сборочных единиц оборудования, используемого в химической промышленности, в том числе и создаваемой в настоящее время nanoиндустрии.

Приведённые в учебном пособии материалы достаточно полно отражают возможности прогрессивных технологий аппаратостроения в процессе создания материальной базы nanoиндустрии в виде высокотехнологичных видов оборудования. Полученные знания и навыки позволят обучающимся эффективнее реализовывать инновационные проекты в своей профессиональной сфере.

Изложение материала выполнено с позиций пользователя, для которого важны осмысление и возможность использования инновационных промышленных технологий в практической деятельности в производственном секторе экономики.

Студенты, заинтересованные в углубленном изучении перспективных направлений развития nanoиндустрии и технологии аппаратостроения, необходимые материалы могут найти в научно-методической литературе, список которой даётся в конце пособия.

Нанотехнологии – это совокупность знаний о способах и средствах проведения процессов, основанных на явлении самоорганизации наноразмерных частиц и систем и на использовании внутренних возможностей систем.

Анализ состояния и тенденций развития объектов наноиндустрии в настоящее время позволяет сделать вывод о том, что одной из наиболее перспективных областей нанотехнологий является синтез углеродных наноматериалов (УНМ) – фуллереноподобных структур, представляющих собой новую аллотропную форму углерода в виде замкнутых, каркасных, макромолекулярных систем. Среди этих материалов особое место занимают углеродные нанотрубки (УНТ) или нанотрубулены, которые при диаметре 1 ... 50 нм и длине до нескольких мкм образуют новый класс квазиодномерных нанообъектов. УНТ обладают рядом уникальных свойств, обусловленных упорядоченной структурой их нанофрагментов: хорошая электропроводность и адсорбционные свойства, способность к холодной эмиссии электронов и аккумулярованию газов, диамагнитные характеристики, химическая и термическая стабильность, большая прочность в сочетании с высокими значениями упругой деформации. Материалы, созданные на основе УНТ, могут успешно использоваться в качестве структурных модификаторов конструкционных материалов, аккумуляторов водорода, элементов радиоэлектроники, добавок в смазочные материалы, лаки и краски, высокоэффективных адсорбентов, газораспределительных слоёв топливных элементов. Широко обсуждается использование углеродных наноструктур в тонком химическом синтезе, биологии и медицине.

Оценивая способы получения УНТ с позиции перспектив промышленного производства, следует констатировать преимущества каталитического синтеза УНТ в процессе пиролиза углеводородов. В качестве аргументов в пользу этого вывода следует отметить: сравнительно низкую энергоёмкость процесса; применение дешёвого и доступного углеродсодержащего сырья; сравнительно «мягкие» технологические параметры синтеза; простоту конструкций и технологичность изготовления используемой аппаратуры; отсутствие необходимости и дорогой очистки от примесей.

Существуют различные оценки объёма мирового рынка производства и реализации углеродных наноматериалов. По некоторым оценкам производство УНТ через несколько лет должно составить несколько сотен тонн, а объём продаж – превысит 3 млрд. евро.

Рынок УНТ отечественного производства в настоящее время находится в стадии становления, в то же время ведущими научно-исследовательскими организациями Российской Федерации получены весомые результаты при проведении исследовательских работ в области синтеза углеродных наноструктур.

Несомненный интерес вызывает опыт создания опытно-промышленного производства многослойных нанотрубок. В пособии описано устройство ёмкостного реактора полунепрерывного принципа действия с неподвижным слоем полидисперсного катализатора, разработанного в г. Тамбове коллективом учёных и специалистов ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», ООО «Тамбовский инновационно-технологический центр машиностроения», ОАО «Тамбовский завод "Комсомолец" им. Н.С. Артёмова» и ООО «НаноТехЦентр».

Обеспечение наноиндустрии необходимым количеством высокопроизводительного оборудования, в том числе и рассмотренных типов, предполагает использование на предприятиях аппаратостроения прогрессивных технологий изготовления деталей аппаратов, обеспечивающих снижение металлоёмкости и затрат труда при изготовлении реакторов синтеза УНМ.

## 1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНОИНДУСТРИИ

---

### 1.1. УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ И НАНОВОЛОКНА

#### 1.1.1. СТРОЕНИЕ ФУЛЛЕРЕНОПОДОБНЫХ НАНОСТРУКТУР

В 1985 г. Гарри Крото и Ричард Смолли с сотрудниками сообщили, что в масс-спектрах паров графита, полученных его испарением под лазерным пучком, имеется ряд интенсивных пиков, отвечающих кластерам (или многоатомным молекулам) углерода. Наиболее стабильными из них оказались  $C_{60}$  и  $C_{70}$ . Как выяснилось в результате структурного анализа, первый из них имел форму футбольного, а второй – регбийского мяча. Впоследствии их стали называть фуллеренами в честь американского архитектора Фуллера, получившего в 1954 г. патент на строительные конструкции в виде многогранных сфероидов для перекрытия больших помещений.

Открытая форма углерода являлась новой по существу. В противоположность алмазу и графиту, структура которых представляет собой периодическую решётку атомов, третья форма кристаллического углерода (фуллерены) является молекулярной.

Количество синтезированных фуллеренов было небольшим, поэтому потребовалось ещё пять лет, когда в 1990 г. Вольфганг Кретчмер и Дональд Хаффман, используя вместо мощного лазера простую угольную дугу, получили эти структуры уже в макроскопических объёмах.

Фуллерен представляет собой молекулу сферической формы, состоящую из 60 и более атомов углерода. Данное соединение достаточно изучено и описаны накопленные сведения о его физико-химических и структурных характеристиках.

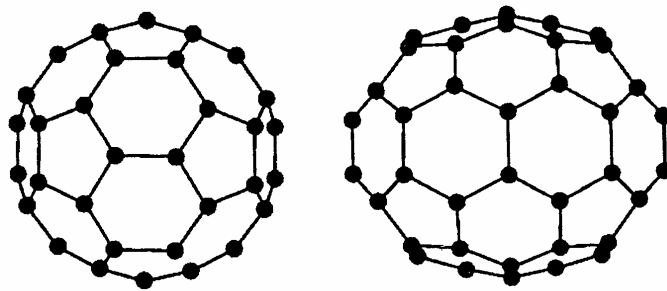


Рис. 1. Структура молекул  $C_{60}$  и  $C_{70}$

Вначале синтез фуллеренов вызвал лишь частный интерес, обусловленный тем, что открыта новая аллотропическая форма углерода, причём одновременно в виде нескольких разновидностей (рис. 1). Однако по мере того, как начали открывать совершенно уникальные свойства наноматериалов, интерес к фуллеренам начал быстро расти. Сегодня изучены очень многие свойства этих удивительных и многочисленных представителей аллотропических форм углерода.

Открытие фуллеренов, естественно, породило достаточно много предположений по их использованию. За период с 1998 по 2002 гг. зарегистрировано 453 патента США, 82 – Японии. Патентная база остальных стран, включая Германию, Канаду, Францию, составила 124 единицы. Однако очень скоро выяснилась неэкономичность и нетехнологичность их использования. Фуллерены назвали примером неосуществлённых возможностей.

Наибольший интерес в этом отношении представляют производные фуллеренов, но и то пока лишь на теоретическом уровне. В частности, несомненно интересны донорно-акцепторные комплексы с переносом заряда на базе  $C_{60}F_{18}$ , некоторые фуллерен-порфириновые структуры. Последние перспективны для создания солнечных батарей. Привлекательно использование фуллеренов для выращивания алмазных плёнок. И, конечно, несомненный интерес представляет их гидрирование с применением в качестве аккумуляторов водорода.

Видимо, перспективным является использование фуллеренов в медицине (например, имеет место анти-ВИЧ активность производных фуллеренов).

Исключительно значимым оказалось открытие в 1991 г. японским спектроскопистом Сумио Инджимой в катодной саже установок синтеза фуллеренов новых графитовых структур. Ими являлись длинные полые волокна, состоящие из графитовых слоёв фуллереноподобной конструкции с диаметральными размерами от 1 до нескольких десятков нанометров, получивших название – углеродные нанотрубки.

**Наноструктурированные материалы.** Перейдём к рассмотрению наноструктурированных материалов, по которым сегодня в мире накоплен большой экспериментальный материал, позволяющий переходить к разработке нанотехнологий.

Прежде всего, рассмотрим суть самого понятия «наноматериал». В самом общем плане наноматериалами можно назвать любые материалы, составляющие которых (строительные блоки) имеют размер порядка нанометра (напомним, что 1 нм =  $10^{-9}$  м). Такими составляющими могут быть большие молекулы, кластеры, частицы вещества или зерна поликристалла. Маршрут создания наночастиц можно представить схемой:

атомарный пар → молекулы → ассоциаты → кластеры → наночастицы и нанокомпозиты.

Однако суть терминов «наночастица», «наноматериал» будет крайне сужена, если рассматривать только размерный фактор. В этом случае остаётся неясной сама суть использования наноматериалов, отождествляемая сегодня с революцией в технике. В это понятие необходимо включить скачкообразное изменение свойств вещества, которое наблюдается при достижении нанометрового размера блоков, составляющих наноматериал. Пороговый размер частиц, определяющий скачкообразное изменение свойств вещества, – размерный эффект – для большинства известных в настоящее время материалов, колеблется в пределах от 1 до 100 нм.

Наноэффект обусловлен скачкообразным изменением энергии активации ( $E_a$ ) процесса, независимо от того протекает он в кинетическом, диффузионном или смешанном режимах.

Микрометр, как и нанометр, – количественная характеристика размера частиц. Но между наносостоянием и субмикросостоянием существует принципиальное различие. Именно нано-, а не субмикросостояние является промежуточным между молекулярным и твёрдотельным состоянием, в котором проявляются кооперативные эффекты. В этом же заключается физическая причина того, что скачкообразное изменение свойств наблюдается в нанометровом диапазоне. Суть дела в том, что расстояния, на которых проявляются физические силы, варьируются в диапазоне от 1 до 100 нм. В связи с этим в конкретном веществе они могут проявляться при разных размерах наночастиц. Из сказанного следует, что не может быть фундаментального размера наночастиц, как для одного и того же, так и для разных веществ. Следует также иметь в виду, что наноматериалы – далеко не всегда кристаллические частицы. Они, как правило, представляют собой термодинамически неравновесные системы, а значит образующие их частицы вовсе не обязательно имеют кристаллически совершенную структуру. Напротив, для строительных блоков наноматериалов часто характерна сильно дефектная структура, иногда их состояние близко к аморфному. Иначе говоря, в наночастицах дальний порядок может быть сильно нарушен, а корреляция кооперативного эффекта определяется ближним порядком. В связи с этим, более точное название наноматериалов – наноструктурированные материалы.

**Классификация наноматериалов.** Разнообразие наноструктурированных материалов обусловило наличие их различных классификаций. Одна из них – по размерности структурных элементов, из которых они состоят. Основные типы наноструктурированных материалов (далее упрощённо – наноматериалы) следующие:

1. Нульмерные (0D).
2. Одномерные (1D).

3. Двумерные (2D).

4. Трёхмерные (3D).

К нульмерным относят кластерные материалы и нанодисперсии, в которых материалы изолированы друг от друга.

К одномерным – нановолоконные (нанопрутковые) с длиной частиц от 100 до  $10^4$  нм.

К двумерным наноматериалам относят плёнки нанометровой толщины. Часто наночастицы в 0D, 1D и 2D-наноматериалах расположены в какой-либо жидкой матрице или находятся на подложке.

К трёхмерным относят порошки, волоконные, многослойные и поликристаллические материалы, в которых 0D-, 1D- и 2D-частицы плотно прилегают друг к другу, образуя между собой поверхности раздела – интерфейсы. Пример трёхмерного наноматериала – поликристалл с нанометровым размером зёрен: в нём весь объём заполняется нанозёрнами, свободная поверхность зёрен практически отсутствует, имеются лишь границы раздела зёрен. Следует полагать, что 3D-наноматериалы в ближайшее время найдут наибольшее применение. Хотя в ряде случаев большую роль могут играть и 2D-наноматериалы, в частности, в качестве нанополюк (процессы защиты материалов от коррозии).

Кроме того, отметим, что различают два типа наночастиц:

1. Частицы упорядоченного строения размером 1 ... 5 нм, содержащие до  $10^3$  атомов (нанокластеры или нанокристаллы).

2. Собственно наночастицы диаметром 5 ... 100 нм, состоящие из  $10^3$  –  $10^6$  атомов.

Однако такая классификация верна только для изотропных (сферических) частиц. Нитевидные и пластинчатые образования могут содержать гораздо больше атомов и иметь один или два линейных размера, превышающих пороговые значения. Но их свойства остаются характерными для вещества в нанокристаллическом состоянии. Если наночастица имеет сложное строение и форму, то в качестве характеристического рассматривают не её линейный размер, а размер её структурного элемента. Такие частицы называют, как правило, наноструктурами. Их линейные размеры могут значительно превышать 100 нм.

Обобщая современные знания в этой области, отметим:

1. Современные теоретические представления о наносистемах пока слишком приближены, чтобы стать основой их использования на практике.

2. Методическая основа изучения свойств наносистем – сочетание эксперимента с математическим моделированием.

3. Характеризация наносистем – сложнейшая задача. Количественные данные о свойствах наночастиц труднодоступны.

4. Сегодня исследования наносистем сосредоточены, в основном, на следующих направлениях:

– разработка теории получения и функционирования наноматериалов, в том числе углеродных наноструктур, сверхпрочных металлов и сплавов, керамик и плёночных композиций, материалов с особыми оптическими, магнитными и электрическими свойствами;

– создание физико-химических основ нанотехнологий, включая характеризацию технологических систем;

– развитие нанофармации и наномедицины, включая разработку лекарственных веществ; изучение механизма их взаимодействия с живыми организмами;

– создание научных основ экологической нанофизикохимии, исследование механизмов образования природных и техногенных аэро- и гидрозолей, обуславливающих загрязнение окружающей среды. Разработка способов очистки от них атмосферы и гидросферы.

Самыми интересными являлись длинные полые волокна, состоящие из графитовых слоёв фуллереноподобной конструкции с диаметральными размерами от 1 до нескольких десятков нанометров, названные – углеродные нанотрубки (УНТ).

УНТ имеют отношение длины к диаметру ~ 1000, так что их можно рассматривать как квазиодномерные структуры. Бездефектные УНТ представляют собой цилиндрические структуры из свёрнутых графеновых слоёв, состоящих из атомов углерода, расположенных по углам сочленения шестиугольников (гексагонов). Различные типы УНТ представлены на рис. 2.

УНТ могут состоять из двух отдельных поверхностей с различными физическими и химическими свойствами. Первая – боковая (цилиндрическая) часть трубки, вторая – закрытый торец, по форме напоминающий половину молекулы фуллерена.

Наименьший и наибольший диаметры однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) составляют соответственно около 0,3 и 5 нм.

На рисунке 3 показан массив нанотрубок, полученный с помощью сканирующей электронной микроскопии.

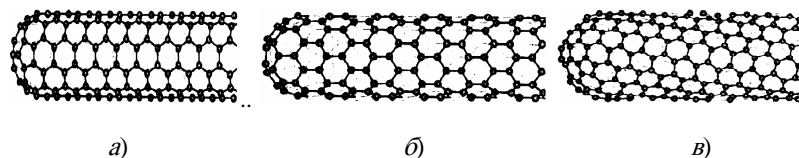


Рис. 2. Углеродные нанотрубки:

*a* – типа «кресло»; *б* – типа «зигзаг»; *в* – хиральная УНТ



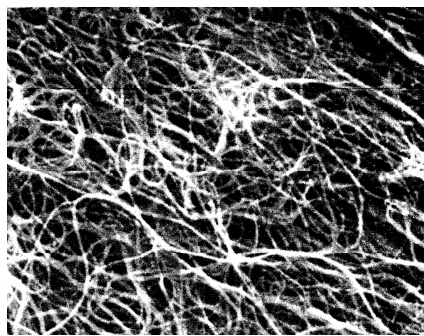


Рис. 3. Однослойные углеродные нанотрубки

Отличительной особенностью ОУНТ является простота их строения, меньшее число дефектов и, как следствие, высокие механические и физико-технические характеристики. Вместе с тем следует отметить, что практическое применение этих наноструктур ограничивается электроникой и приборостроением, где требуется сравнительно небольшое количество нанотрубок. Поэтому их высокая стоимость (цена чистых и функционализированных ОУНТ достигает 1000 \$/г) не может существенно снизить коммерческую привлекательность их использования. Например, из 1 мг ОУНТ можно сделать тысячи эффективных кантивилеров различных сканирующих устройств с практически не ограниченным сроком эксплуатации.

Отдельно принято выделять двухслойные нанотрубки (ДУНТ), которые являются как бы переходной формой между однослойными и многослойными (МУНТ). Их внешний диаметр варьируется от 1,8 до 7,1 нм.

По мнению ряда исследователей, ДУНТ могут соперничать с ОУНТ по ряду показателей, в частности, по механическим свойствам. Вместе с тем сложность синтеза и последующей очистки ДУНТ, определяет не многим меньшую стоимость продукта на рынке УНМ.

Наконец наиболее многочисленными по строению, морфологическим характеристикам и свойствам являются МУНТ.

Отсутствие к настоящему времени общепризнанной классификации УНМ, основанной не только на морфологических признаках, но и на взаимосвязке свойств отдельных разновидностей углеродных наноструктур, не позволяет категорично относить конкретные УНМ к разряду многослойных трубок или волокон. Тем более, что при синтезе УНМ редко получаются в высшей степени однородные структуры. Зачастую это смеси различных наноуглеродных образований с очевидно различными свойствами.

### 1.1.2. СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Следует отметить, что на современном этапе изучения углеродных наноструктур сформировалось очевидное мнение о том, что те или иные формы УНМ образуются вследствие влияния большого количества факторов, из которых главные:

- способ синтеза;
- исходные компоненты;
- технологические режимы синтеза.

Широкий спектр условий проведения процессов синтеза УНМ определяет столь же широкий диапазон их качественных характеристик. При этом результаты исследований и, в частности, свойства УНМ отличаются весьма значительно при, казалось бы, несущественном отличии условий их создания.

Упругие механические свойства протяжённой цилиндрической оболочки, а именно таким объектом теории упругости представляется углеродная нанотрубка, характеризуются набором параметров (модулей упругости).

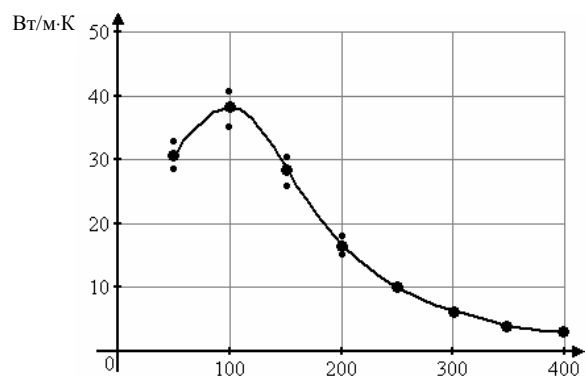
Основным параметром УНТ, характеризующим его прочность, считают предельный модуль Юнга. Анализ значений модуля упругости позволяет сделать заключение, что нанотрубки представляют собой материал с рекордным значением модуля Юнга (в среднем  $\approx 1$  ТПа). МУНТ уступают ОУНТ по ряду прочностных показателей.

Исследования последних лет позволили обнаружить новые свойства УНТ. В частности, открыта способность вертикально стоящих УНТ испытывать осевую эйлеровскую деформацию, сопровождающуюся существенным сокращением их высоты, что придаёт этому материалу необычные свойства. Обнаружено, что вертикально-ориентированный слой нанотрубок ведёт себя как пенообразный материал, способный под действием нагрузки обратимым образом многократно менять свою плотность.

При изгибе УНТ исключительно проявляют эластичность и образуют своеобразные узлы, способные упруго распределяться. Это свойство отличает УНТ от большинства других материалов, имеющих сопоставимую прочность, но являющихся весьма хрупкими.

Значение теплопроводности  $\lambda$  при разных температурах для УНТ показаны на рис. 4. Видно, что при комнатной температуре  $\lambda$  достигает  $\approx 6600$  Вт / (м · К).

Удельное электрическое сопротивление  $\rho_3$  удалось изучить только в 1996 г. Оказалось, что  $\rho_3$  может принимать значение от  $5 \cdot 10^{-8}$  до 0,008 Ом · м. Таким образом, минимальная величина  $\rho_3$  на порядок меньше, чем у графита.



**Рис. 4. Зависимость теплопроводности ( $\lambda$ , Вт/м·К) УНТ от температуры ( $T$ , К)**

Еще одним особым свойством УНТ является проявление способности к автоэлектронной эмиссии, при этом напряжённость электрического поля (создаваемого внешним источником) в зоне «головки» УНТ в сотни раз превышает объёмную напряжённость. Это свойство реализуется в аномально высоких значениях плотности тока эмиссии ( $\approx 0,5$  кА/м) при сравнительно малом внешнем напряжении ( $\approx 500$  В).

При напряжённости электрического поля, равной 1,6 МВ/м, работа выхода электронов из УНТ равна  $1,60219 \cdot 10^{-19}$  Дж, что делает их лучшим материалом для автоэмиссионных (холодных) катодов.

Синтезированы УНТ, заполненные сверхпроводящим материалом (TaC), что открывает перспективу использования НТ в технологии полупроводников.

Углерод в виде УНТ приобретает необычные магнитные свойства. В частности, проявляется большая отрицательная магнитная восприимчивость УНТ, указывающая на их диамагнитность, что, скорее всего, обусловлено перемещением электронных токов по окружности.

Следует отметить, что вышеуказанные замечательные свойства УНТ могут быть значительно усилены за счёт применения дополнительных манипуляций с ними. Этим аспектом совершенствования качественных параметров УНТ применительно к конкретным областям применений призвана заниматься особая отрасль нанотехнологий – химия углеродных нанотрубок.

Направления возможных исследований в этой области:

- многостадийная, целевая очистка;
- солюбилизация;
- самосборка и полимеризация;
- модифицирование путём функционализации (присоединение функциональных групп); интеркалирование; адсорбция и хемосорбция; декорирование; заполнение внутренних областей и др.

### 1.1.3. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ УНМ

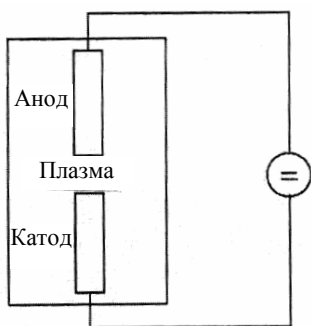
**Оптимальные условия синтеза материалов.** Для оптимальной организации рабочей зоны оборудования для получения наноматериалов необходимо учитывать следующее:

- определённость и воспроизводимость исходного состояния совокупности реагентов достигаются тем труднее, чем сложнее система (фазовый и химический состав, активность компонентов, их предыстория);
- степень неравновесности процессов перехода от исходных к конечным продуктам определяет движущая сила процесса, обуславливающая механизм реакций, что оказывает сложное влияние на природу конечного продукта;
- длительность пути (стадийность, скорость) от исходных к конечным продуктам определяет детерминированность в поведении системы. Следует учитывать, что рост температуры проведения процесса увеличивает число маршрутов и промежуточных продуктов. Целесообразно проведение импульсных воздействий продолжительностью в миллисекунды, ведущих к активации реакционной массы (термодинамические процессы). К сожалению, сегодня только эмпирический подход позволяет оптимизировать условия воздействия на систему;
- по возможности, устранение бифуркаций процесса в реакционной зоне, в частности, использование затравок в виде совершенных кристаллов исходного продукта;
- использование компьютерного моделирования для поиска путей устранения хаоса.

Несмотря на то, что к настоящему времени уже десятки, если не сотни, научно-исследовательских организаций по всему миру располагают оборудованием для синтеза УНМ, все они используют технику, реализующую три основных способа:

- 1) дуговой;
- 2) лазерной абляции;
- 3) синтез УНМ из углеродосодержащих газов.

**Дуговой способ.** Наиболее широко распространён метод получения УНТ, использующий термическое распыление графитового электрода в плазме дугового разряда, горящего в атмосфере гелия (He). Метод, использованный в 1991 г. японским учёным С. Иджимой, отличался от метода получения фуллеренов тем, что электроды не входили в соприкосновение между собой, а находились на некотором расстоянии друг от друга во время горения дуги. В этих условиях испаряющийся с анода углерод конденсируется на катоде в виде осадка преимущественно цилиндрической формы.



**Рис. 5. Схема распыления графита в плазме электрической дуги** (два графитовых электрода используются для создания электрического дугового разряда в инертной газовой атмосфере)

Были получены углеродные нанотрубки в форме острых иголок диаметром от 4 до 30 нм и длиной 1 мкм на отрицательном конце углеродного электрода при постоянном токе дугового разряда (рис. 5). Модифицирование метода, заключающееся в нахождении оптимальных параметров: давления He, величины тока дуги, напряжения и зазора между электродами – позволило увеличить выход нанотрубок.

На рисунке 6 представлена схема установки для получения УНМ, использующая дуговой способ их синтеза в его классической интерпретации.

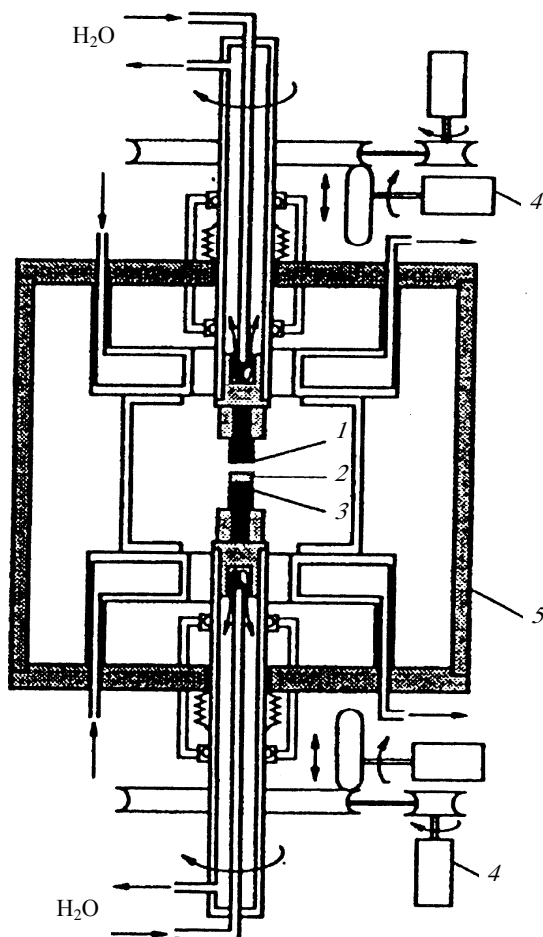
В дуговом разряде между анодом и катодом при напряжении 20 ... 25 В, стабилизированном постоянном токе дуги 50 ... 100 А, межэлектродном расстоянии 0,5 ... 2 мм и давлении He 100 ... 500 торр происходит интенсивное распыление материала анода. Часть продуктов распыления, содержащая графит, сажу и фуллерены осаждается на охлаждаемых стенках камеры, часть, содержащая графит и многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), осаждается на поверхности катода.

Отличительной особенностью рассматриваемого способа синтеза УНМ является то, что именно с его помощью получают наиболее качественные ОУНМ длиной до нескольких микрометров с близкими морфологическими показателями и малым диаметром (1 ... 5 нм).

Вместе с тем следует отметить, что достижение такого высокого качества сопряжено с большими технологическими трудностями, связанными в первую очередь с необходимостью осуществления многостадийной очистки продукта от сажевых включений и других примесей. Выход ОУНТ не превышает 20 ... 40%.

На стабильность протекания технологического процесса, а, следовательно, и качество УНТ влияет множество факторов. Это – напряжение, сила и плотность тока, температура плазмы, общее давление в системе, свойства и скорость подачи инертного газа, размеры реакционной камеры, длительность синтеза, наличие и геометрия охлаждающих устройств, природа и чистота материала электродов, соотношение их геометрических размеров, а также ряд параметров, которым трудно дать количественную оценку, например скорость охлаждения углеродных паров, и др.

Такое громадное количество управляющих параметров значительно усложняет регулирование процесса, аппаратное оформление установок синтеза и ставит препятствие для их воспроизводства в масштабах промышленного применения.

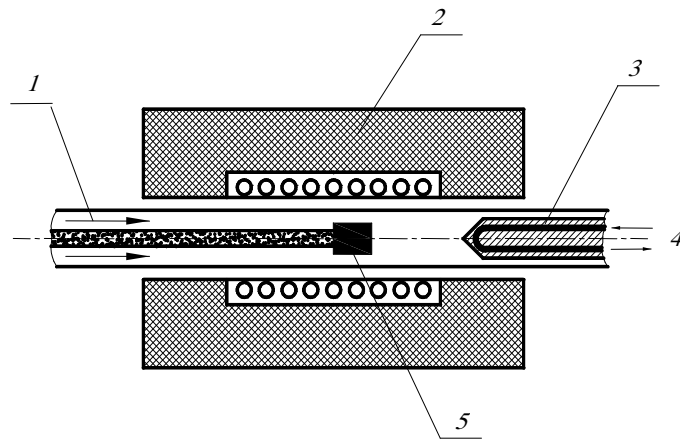


**Рис. 6. Схема установки для получения углеродных нанотрубок:**

1 – графитовый анод; 2 – осадок, содержащий УНТ; 3 – графитовый катод;

4 – устройство для автоматического поддержания межэлектродного расстояния на заданном уровне; 5 – стенки камеры

Лазерное испарение графита. В 1995 г. группа Р. Смоли сообщила о синтезе УНТ лазерным испарением (абляции). Устройство использованной установки показано на рис. 7.



**Рис. 7. Схема аппарата для производства УНТ способом лазерной абляции:**  
 1 – инертный газ; 2 – печь; 3 – охлаждаемый медный коллектор;  
 4 – охлаждающая вода; 5 – графитовая мишень

Импульсный или непрерывный лазер использовался, чтобы испарить графитовую мишень в разогретой до 1200°C печи. Камера в печи была заполнена гелием или аргоном с давлением в пределах 500 торр. В ходе испарения формировалось очень горячее облако пара, которое затем растягивалось и быстро охлаждалось. Молекулы и атомы углерода конденсировались, формируя большие молекулы, включая фуллерены. Катализаторы также начинали конденсироваться, но более медленно, и, присоединяясь к углеродным молекулам, предотвращали их закрытие. Из этих начальных скоплений молекул углерода образовывались УНТ, пока частицы катализатора не становились слишком большими или пока не охлаждались достаточно, чтобы углерод больше не мог диффундировать сквозь или по поверхности частиц катализатора. Также возможно то, что частицы катализатора покрывались слоем аморфного углерода и не могли больше адсорбировать его, и рост УНТ останавливался.

В случае чистых графитовых электродов ведётся синтез МУНТ, но и однородные ОУНТ синтезируются при использовании смеси графита с Co, Ni, Fe. Лазерное испарение приводит к более высокой производительности при синтезе ОУНТ, и нанотрубки имеют лучшие свойства и более узкое распределение по размерам, чем ОУНТ, произведённые при дуговом разряде.

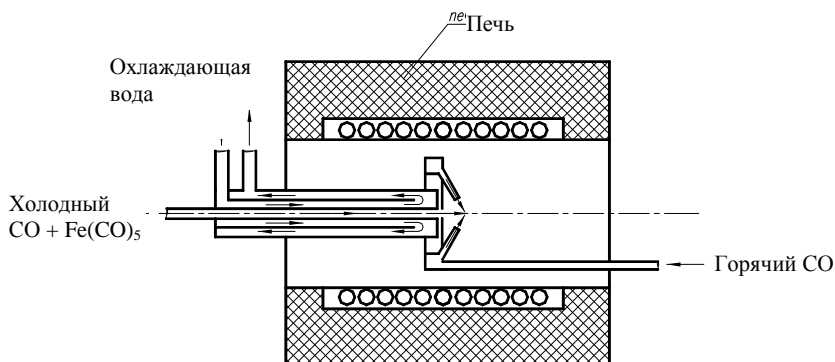
В рассматриваемом методе по сравнению с дуговым число параметров, определяющих производительность и морфологию УНТ, гораздо меньше. Поэтому перспектива этого способа синтеза УНТ как объекта промышленного применения представляется более реальной. Вместе с тем следует отметить, что реализация лазерного синтеза предусматривает использование очень дорогого и сложного в эксплуатации оборудования, требует большого количества затрачиваемой энергии.

Образование углеродного пара происходит при 3000°C из твёрдой фазы (мишени) в сильно неравновесном состоянии. Сформированные таким образом нанотрубки смешаны с материалом мишени, что делает затруднительной очистку и, следовательно, практическое использование полученного материала.

Синтез УНМ из углеродсодержащих газов. По исходному сырью можно выделить две группы процессов, первая из которых включает диспропорционирование CO, вторая – пиролиз углеводородов.

Работы Р. Смолли положили начало созданию процесса HiPCO (The High pressure CO) – методики для каталитического производства ОНТ в непрерывном потоке CO (исходное сырьё) с использованием  $Fe(CO)_5$  в качестве железосодержащего катализатора. Нанотрубки получают, пропуская CO, смешанный с  $Fe(CO)_5$ , сквозь нагретый реактор. Схема реактора для проведения процесса HiPCO показана на рис. 8.

Этим методом были произведены нанотрубки диаметром всего 0,7 нм, которые, как предполагается, имеют наименьшие размеры достижимых химически устойчивых ОНТ. Средний диаметр полученных ОНТ в процессе HiPCO составляет приблизительно 1,1 нм.



**Рис. 8. Схема процесса HiPCO**

Вторая группа процессов синтеза (пиролиз) из углеродсодержащих газов включает гораздо больше вариантов. Пиролизу в принципе могут подвергаться любые углеродсодержащие вещества.

Из вышеперечисленного следует, что в качестве источника углерода для процессов синтеза УНМ могут использоваться практически любые углеродсодержащие газы. Однако при создании технологии промышленного синтеза УНМ целесообразно выбирать наиболее доступные и дешёвые газы, к тому же обеспечивающие высокую производительность, например, метан или пропан-бутановые смеси.

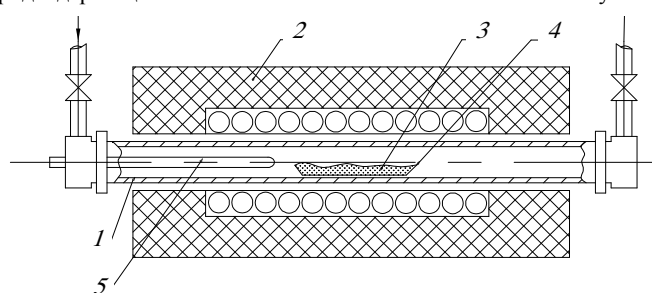
**Пиролиз углеводородов.** По способу организации процессы пиролиза можно разделить на две группы: с катализатором на носителе и с летучим катализатором. В первом случае активный компонент катализатора вводят в реакционную зону на подложке или носителе в твёрдом виде, во втором – в виде паров или растворов, распылённых в тонкие капли. В качестве паров используют карбонилы, фталоцианины, металлоцены и другие соединения металлов, в качестве растворов, например, – карбонилы металлов в толуоле. «Растворный» вариант реализуют в инжекторных реакторах.

Одним из достоинств процессов с катализатором на носителе является значительно большее количество УНТ и УНВ, получаемых на единицу массы катализатора. Величина удельного выхода при синтезе ОНТ обычно меньше, чем при получении МУНТ. Ещё одним параметром, определяющим эффективность процессов с катализатором на носителе, является удельная производительность по катализатору, т.е. количество УНТ или УНВ, получаемых на единицу массы катализатора в единицу времени.

Используют разнообразные способы активирования процесса: термический (внешний нагрев реактора, горячая нить, частичное сжигание углеводорода), плазменный (различные виды разрядов), лазерный (селективное возбуждение колебательных мод), с помощью электрического потенциала на подложке, комбинированный (горячая нить и разряд, селективное возбуждение и разряд).

Пиролитические способы допускают матричный синтез путём, например, выращивания УНТ и УНВ на катализаторе, введённом в нанопоры мембран. Только каталитическим пиролизом, используя возможности процесса химического осаждения из газовой фазы, можно получать структурированные осадки УНТ и УНВ на подложках с катализатором, нанесённые в виде упорядоченных островков, полос и любых фигур, т.е. изготавливать элементы приборов.

Подавляющая часть научной и патентной литературы по синтезу углеродных УНТ и УНВ посвящена периодическим процессам. Их реализуют, как правило, в трубчатых реакторах, типовая схема которого представлена на рис. 9.



**Рис. 9. Схема горизонтального периодического реактора для пиролиза углеводородных газов:**

1 – кварцевая труба; 2 – изоляция; печь с резистивным обогревом; 3 – слой катализатора; 4 – лодочка; 5 – термопара

Нагретую до температуры пиролиза (550 ... 1000°C) реакционную зону продувают инертным газом (Ar, He), затем подают углеродсодержащий газ. Движущийся вдоль катализатора газ диффундирует сквозь его слой и сорбируется на поверхности активных центров (металл), где протекает ряд последовательных химических реакций, конечными продуктами которых являются углерод и водород.

Продуктами данного процесса, который классифицируется как газофазное химическое осаждение (ГФХО) или CDV-процесс, являются УНМ: ОУНТ, МУНТ и УНВ.

Свойства пиролитических УНМ отличаются от свойств наноструктур, полученных дуговым и абляционным способом. Как правило, они содержат большее количество дефектов, имеют широкий диапазон рассеяния диаметральных размеров и длины, большие межслоевые расстояния.

Поэтому, несмотря на кажущуюся простоту организации пиролитических способов синтеза, они требуют тщательного подхода к выбору используемых параметров, изучению и оптимизации кинетических характеристик процесса. В этом случае удаётся получить УНМ с очень высокими качественными показателями, в том числе и ОУНТ.

По мнению учёных, основными параметрами, влияющими на структуру, морфологию и свойства пиролитических УНМ являются:

- состав газовой смеси;
- природа каталитических систем;
- температура и давление;
- продолжительность процесса;
- условия осуществления фазовых превращений, определяемых конструкцией реактора.

При создании условий для получения УНМ в промышленных масштабах следует принять во внимание, что связь производительности и качества получаемого материала в зависимости от вида газового сырья проявляется кинетикой процесса. Немаловажным является также доступность сырья и безопасность производства.

Для прикладных нужд важно добиться минимального присутствия в продукте аморфного углерода, с этой целью применяют разбавление углеводорода водородом.

Важнейшим компонентом пиролитического способа синтеза УНМ является природа каталитической системы. При этом следует учитывать не только состав, но и способ его приготовления и нанесения на подложку.

Круг используемых для получения УНМ пиролизом углеводородов катализаторов достаточно обширен. В основном используются металлы 3d-группы (железо, никель, кобальт) и их бинарные смеси и сплавы с другими металлами: Co/Fe, Fe/Mo, Co/Mo, Fe/Cu.

Труднодостижимая однородность распределения активных частиц катализатора в носителе может быть достигнута применением золь-гель-методов приготовления.

Принципиальное значение имеют природа и состав катализаторов пиролиза углеводородов. Именно они в значительной мере определяют температуру и давление при проведении процессов, характер получаемых нанотрубок.

До сих пор чётко неясны факторы, определяющие скорость деструкции углеводородов и роста УНТ, что не позволяет получить аналитические выражения кинетических уравнений. Вместе с тем важнейшими факторами роста считаются следующие:

1. Характер и природа реакций, протекающих как на поверхности катализатора, так и в газовой фазе.
2. Размер частиц катализатора.

## 1.2. АППАРАТУРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

### 1.2.1. АППАРАТЫ ДЛЯ ГАЗОФАЗНОГО ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

Подавляющая часть научной и патентной литературы по синтезу углеродных наноматериалов посвящена периодическим процессам. Наиболее простые аппараты для осуществления периодического процесса синтеза углеродных наноматериалов на неподвижном слое катализатора, как правило, представляют собой обогреваемую снаружи горизонтальную трубу (рис. 10).

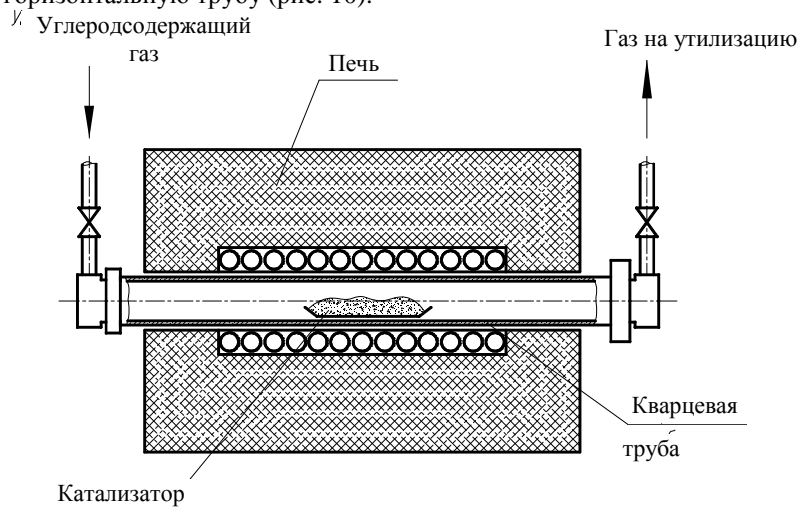


Рис. 10. Схема горизонтального периодического реактора для пиролиза углеродсодержащих газов

Например, для синтеза углеродных нанотрубок может быть использован цилиндрический кварцевый реактор объёмом 2,1 дм<sup>3</sup> с перемешиванием слоя катализатора путём вращения реактора электроприводом со скоростью 60 ... 90 мин<sup>-1</sup>. Ось вращения реактора наклонена под углом 8° к горизонту. Газовую смесь подавали в реактор через неподвижную кварцевую насадку, вставляемую в горловину реактора на шлифе, смазанном минеральным маслом. Реактор помещали в электропечь с регулируемой температурой.

Перед началом работы в реактор вносили катализатор и в токе аргона температуру поднимали до 680°C. По достижении этой температуры в реактор подавали газовую смесь этилена (400 см<sup>3</sup>/мин) и водорода (200 см<sup>3</sup>/мин). После этого аргон отключали, а выходящие из реактора газы отводили из кварцевой трубки и сжигали.

Непрерывно действующие реакторы имеют известные преимущества перед реакторами периодического действия.

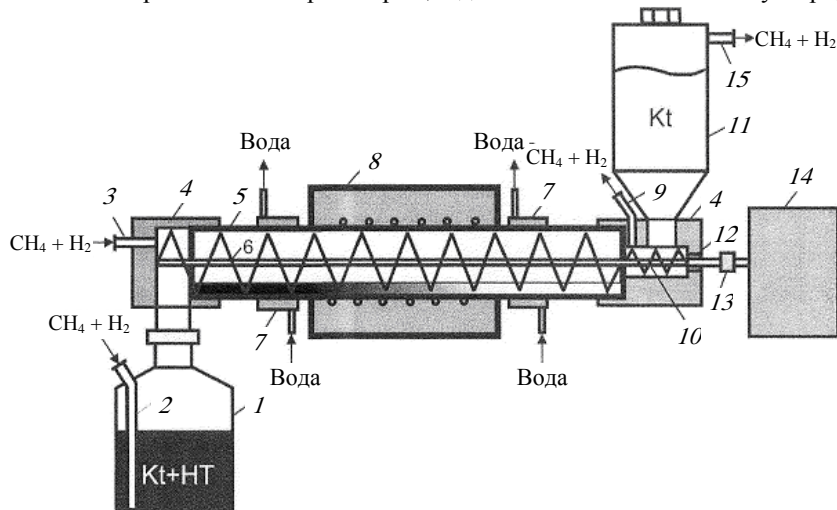
В качестве другого примера можно рассматривать трубчатый шнековый реактор. Средняя часть реактора (зона пиролиза) нагревается до требуемой температуры с помощью электрической печи. Движение катализатора осуществляется принудительно с помощью шнека, выполненного из электротехнической меди. Охлаждение концов реактора, на которых крепятся дозатор, ёмкость с катализатором и приёмник, осуществляется с помощью медных холодильников; теплоноситель – вода. Аппарат выполнен из кварцевого стекла. Регулирование скорости подачи катализатора в реактор и скорости его продвижения в реакторе осуществляется электродвигателем. Схема реактора представлена на рис. 11.

Производительность реактора весьма невелика – 3,0 г смеси катализатора с нанотрубками за 4 часа непрерывной работы. После удаления катализатора (кипячение с 20 %-ной HCl) масса нанотрубок составила 1,8 г.

Учёными также разработана схема непрерывно действующей установки для получения углеродных нанотрубок (рис. 12).

Установка включает реактор 1, работающий в режиме псевдооживления катализатора. Сначала каталитические частицы поступают в камеру восстановления 2, где происходит восстановление катализатора водородом или аммиаком, нагретым до необходимой температуры. Затем они попадают в камеру подогрева 3, где нагреваются инертными газами, например гелием,

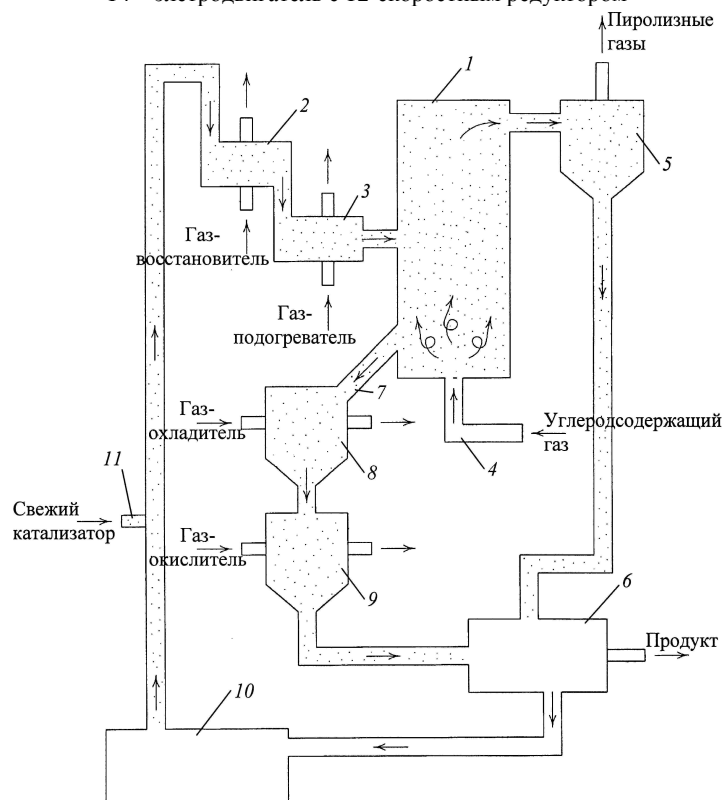
и направляются в реактор 1, где ожижаются потоком углеродсодержащего газа, поступающего по патрубку 4.



**Рис. 11. Схема реактора непрерывного синтеза углеродных нанотрубок каталитическим пиролизом метана с шнековым реактором:**

1 – приёмник; 2 – штуцер для продувки приёмника метано-водородной смесью; 3 – штуцер для подачи метано-водородной смеси в реактор; 4 – фланец;

5 – реактор из кварцевого стекла; 6 – транспортирующий шнек; 7 – холодильник; 8 – печь с резистивным нагревом; 9 – штуцер для отвода метано-водородной смеси из реактора; 10 – питающий шнек; 11 – загрузочный бункер-шлюз с катализатором; 12 – сальниковое уплотнение; 13 – соединительная муфта; 14 – электродвигатель с 12-скоростным редуктором



**Рис. 12. Схема непрерывно действующей установки для производства углеродных нанотрубок**

В ходе роста нанотрубок в ожиженном слое катализатора лёгкая фракция может покидать вместе с газообразными продуктами пиролиза реактор 1, поэтому на выходе устанавливается сепаратор 5 для отделения лёгкой фракции катализатора.

Из сепаратора лёгкие частицы направляются в накопитель 6 для дальнейшей очистки и рецикла. Тем временем каталитические частицы, находящиеся в реакторе 1, взаимодействуют при заданных условиях с реагентным газом и удаляются по патрубку 7 в камеру охлаждения 8. В камере охлаждения частицы взаимодействуют с инертным газом, например с гелием, и направляются в камеру окисления аморфного углерода 9. Из камеры окисления частицы попадают в накопитель 6.

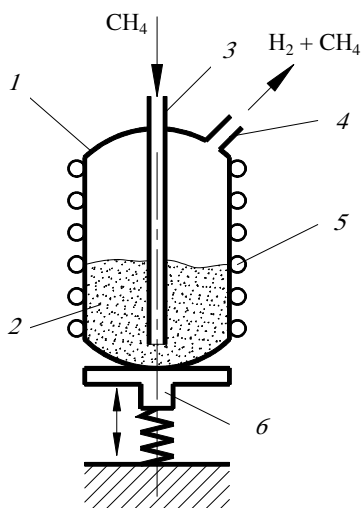


Рис. 13. Схема аппарата с виброожиженным слоем катализатора

Максимальную площадь контакта фаз в системе газ–твёрдое обеспечивают аппараты с ожиженным слоем. Для мелкодисперсного катализатора наиболее приемлемым способом ожижения может оказаться виброожижение, которое практически исключает унос.

Реакция разложения углеводородов является эндотермической. По этой причине практическая реализация предлагаемого процесса в крупном масштабе связана с решением проблемы равномерного подвода в реактор большого количества тепла. Это может быть реализовано в аппарате с виброожиженным слоем катализатора (рис. 13).

Реактор состоит из корпуса 1, в котором содержится слой катализатора 2, узла подачи реагента 3, отводящего патрубка 4 и нагревателя 5. Слой катализатора в реакторе виброожижается с помощью вибропривода 6, подключённого к корпусу реактора.

В реактор засыпался гранулированный катализатор. С помощью вибропривода катализатор приводился в виброожиженное состояние. Нагревателем температура катализатора доводилась до 550°C, затем в виброожиженный слой катализатора подавался метан, который, проходя через слой катализатора, разлагался на углерод волокнистой структуры и водород. Расход метана поддерживался таким, чтобы обеспечивалось необходимое время контакта (в расчёте на объём катализатора) реагента и катализатора. Образовавшийся углерод оставался на катализаторе и полностью удерживался в реакторе. Процесс проводился до полной дезактивации катализатора.

Для предотвращения агломерации предложено в слой мелкодисперсного катализатора добавлять инертный материал.

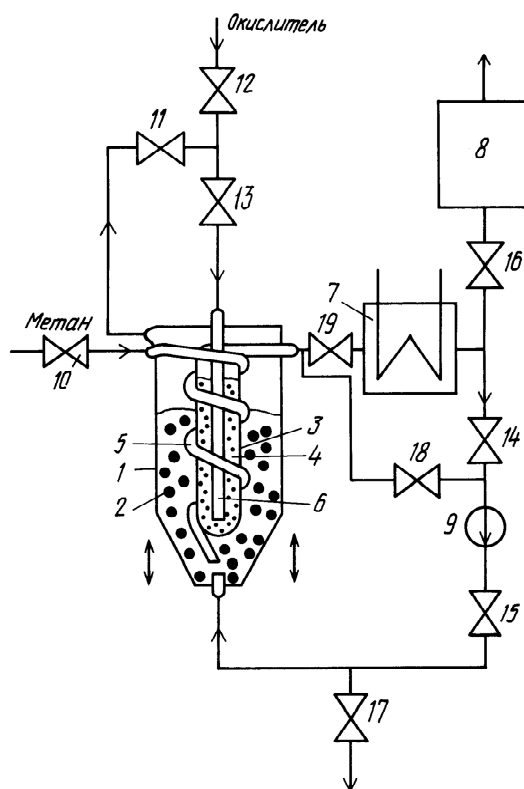
Существует другая оригинальная конструкция реактора с возможностью виброожижения слоя катализатора. Установка (рис. 14) состоит из первого реактора 1 разложения, внутри которого помещён катализатор 2 разложения углеводородов и реактор 3 окисления водорода с катализатором 4 парциального окисления водорода. Реактор 3 обвивает трубка 5 предварительного нагрева свежего углеводорода. Внутри реактора 3 установлена трубка 6 подачи водородсодержащей газообразной смеси. Кроме того, в состав установки входят конденсатор 7, второй реактор 8 разложения углеводородов, мембранный насос 9 и вентили 10–19.

Одним из возможных вариантов работы установки является следующий. На дно реактора 1 разложения углеводородов засыпают никельсодержащий катализатор 2. В реактор 3 окисления водорода помещают медно-хромовый катализатор парциального окисления водорода. Вентили 10, 11, 12, 13, 14, 15, 19 открываются, остальные – закрыты. Свежий метан подают через вентиль 10 в трубку 5 предварительного нагрева свежего метана, где нагревают за счёт контакта трубки с корпусом реактора 3 окисления водорода. Попадая на дно первого реактора разложения, метан поднимается вверх, контактируя с виброожиженным слоем катализатора 2 и разлагаясь на нём. При разложении углерод откладывается на катализаторе, а газообразные продукты реакции, проходя через вентиль 11, смешиваются с кислородом и по трубке 6 направляются в реактор 3 парциального окисления водорода. Поднимаясь вверх внутри корпуса реактора 3, газообразная смесь псевдоожижает частицы катализатора 4 парциального окисления, а водород, находящийся в смеси, окисляется до воды. После этого смесь направляется в конденсатор 7, где вода конденсируется и отделяется от метана. Метан через вентиль 14, 15 с помощью насоса 9 направляется снова в реактор 1 разложения.

При проектировании реакторов синтеза УНМ в виброожиженном слое возникает необходимость исследовать физико-механические свойства сыпучих реагентов, которые оказывают существенное влияние на характер вибрационного воздействия на реактор. К таким свойствам следует отнести насыпную плотность, истинную плотность, эквивалентный диаметр частиц, способность материала передавать вибрационное воздействие и т.п.

Задача осложняется тем, что в ходе процесса эти свойства значительно меняются из-за роста УНТ, вызывая необходимость регулирования, а иногда и изменения характера силового воздействия на реактор. Подача углеродсодержащего сырья в реактор также может вызывать нежелательные явления, например, создание неблагоприятной гидродинамической обстановки в аппарате и нарушение температурного режима в зоне реакции. С другой стороны, подача газообразного сырья позволяет снизить вибрационное воздействие на реактор вследствие создаваемой газом подъёмной силы. При этом однородность слоя сохраняется.



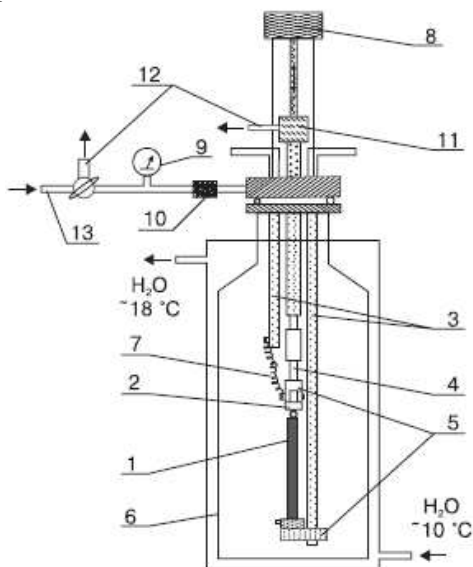


**Рис. 14. Установка с реакторами разложения углеводородов и частичного окисления водорода:** 1 – реактор разложения углеводородов; 2 – катализатор разложения углеводородов; 3 – реактор частичного окисления водорода; 4 – катализатор окисления водорода; 5 – трубка подогрева углеводородов; 6 – трубка подачи водородсодержащей смеси и окислителя; 7 – конденсатор; 8 – второй реактор разложения углеводородов; 9 – мембранный насос; 10 ... 19 – вентили

### 1.2.3. АППАРАТЫ ДЛЯ ДУГОВОГО СИНТЕЗА УНМ

Плазменный метод получения углеродных наноматериалов по своей физической сущности наиболее близок к электродуговому сжиганию графитовых электродов.

Синтез ОНТ может проводиться в установке, схема реактора которой представлена на рис. 15. Кроме реактора в установку входят источник постоянного тока, системы вакуумирования и напуска очищенного газа, блок регулируемой подачи катода, вольтметры и осциллограф.



**Рис. 15. Электродуговая установка для синтеза фуллеренов и нанотрубок:**

- 1 – графитовый анод; 2 – графитовый катод; 3 – тоководы; 4 – керамический изолятор; 5 – молибденовые держатели; 6 – реактор; 7 – медный жгут; 8 – шаговый электродвигатель; 9 – вакуумметр; 10 – стеклянный фильтр; 11 – вакуумный порт; 12 – штуцеры к вакуумным насосам; 13 – штуцер к системе подготовки газов

Установка позволяет варьировать следующие параметры процесса: величину тока и напряжения, скорость подачи катода, зазор между электродами, давление и состав среды и т.д.

Перед заполнением реактора рабочим газом графитовые стержни прогревались при 900°C в вакууме для дегазации. В качестве катализатора можно использовать смесь порошков кобальта и никеля.

Испарение проводили в среде гелия. Продукты электродугового испарения металл-графитового электрода конденсировались на боковых стенках охлаждаемой камеры («пристеночная» сажа), вокруг катода («воротниковая» сажа) и непосредственно на катоде («депозит»).

### 1.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА И АППАРАТУРА ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА УНМ «ТАУНИТ»

В данном разделе рассматривается разработанная в ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» технология и оборудование для получения углеродного наноматериала, получившего торговое наименование «Таунит».

#### 1.3.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА СИНТЕЗА УНМ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОГО ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ (ГФХО)

Трудности перехода от лабораторных результатов к созданию установок синтеза значительной производительности часто являются непреодолимыми из-за очевидной специфики промышленных технологий. Это требования к безопасности эксплуатации оборудования, экологические ограничения, сложность технологии изготовления и другие проблемы. Немаловажными являются и экономические аспекты организации промышленных производств с позиций обеспечения конкурентоспособности получаемых нанопродуктов на активно формирующемся рынке УНМ.

Для создания промышленной схемы синтеза УНМ был выбран метод ГФХО, что обосновано следующими аргументами:

- 1) наличие положительного опыта в создании аппаратов подобного типа, главным образом за рубежом;
- 2) дешёвое и доступное углеводородное сырьё – бутан-пропановая смесь, а также возможно – метан, ацетилен и т.д.;
- 3) сравнительно низкая себестоимость компонентов катализатора (3d-металлы и их бинарные смеси и сплавы с другими элементами, глицин, окислы Mg и др.);
- 4) селективность морфологии получаемых наноматериалов в зависимости от исходных параметров технологического процесса, осуществляемого на одном и том же оборудовании, что расширяет область реального использования получаемых продуктов;
- 5) возможность получения, наряду с производством УНМ, чистого водорода, свободного от CO и CO<sub>2</sub>, необходимого для водородной энергетики и химического синтеза;
- 6) удобство управления и возможность организовать непрерывные процессы синтеза;
- 7) низкие энергозатраты по сравнению с альтернативными методами получения углеродных наноструктур.

Как уже отмечалось ранее, специфической особенностью каркасных фуллереноподобных углеродных наноструктур является многообразие их форм и структур: фуллерены; однослойные, двухслойные, многослойные (цилиндрические, конические, спиральные, бамбукообразные и др.) нанотрубки; нановолокна, также отличающиеся по форме и строению графеновых слоёв, но не имеющие внутренних каналов. Это объясняется тем, что даже незначительные изменения условий проведения синтеза (состав катализатора, температура, состав углеродсодержащего компонента и его расход, давление и многое другое) неизбежно приводят к изменению структуры, морфологии и свойств получаемых УНМ.

Реализация ГФХО-процесса позволяет обеспечить достаточно стабильное воспроизведение рациональных технологических параметров синтеза УНМ и, как следствие, получение материала с постоянными морфологическими и физико-механическими характеристиками.

Была разработана технологическая схема производства УНМ (рис. 16).

Технологическая схема предусматривает использование различных аппаратов, ёмкостей, коммуникаций, элементов контроля и управления технологическим процессом, функционально разграниченных на 4 участка:

- приготовление катализатора;
- подготовка газовых компонентов;
- синтез УНМ;
- сушка, диспергирование и классификация.

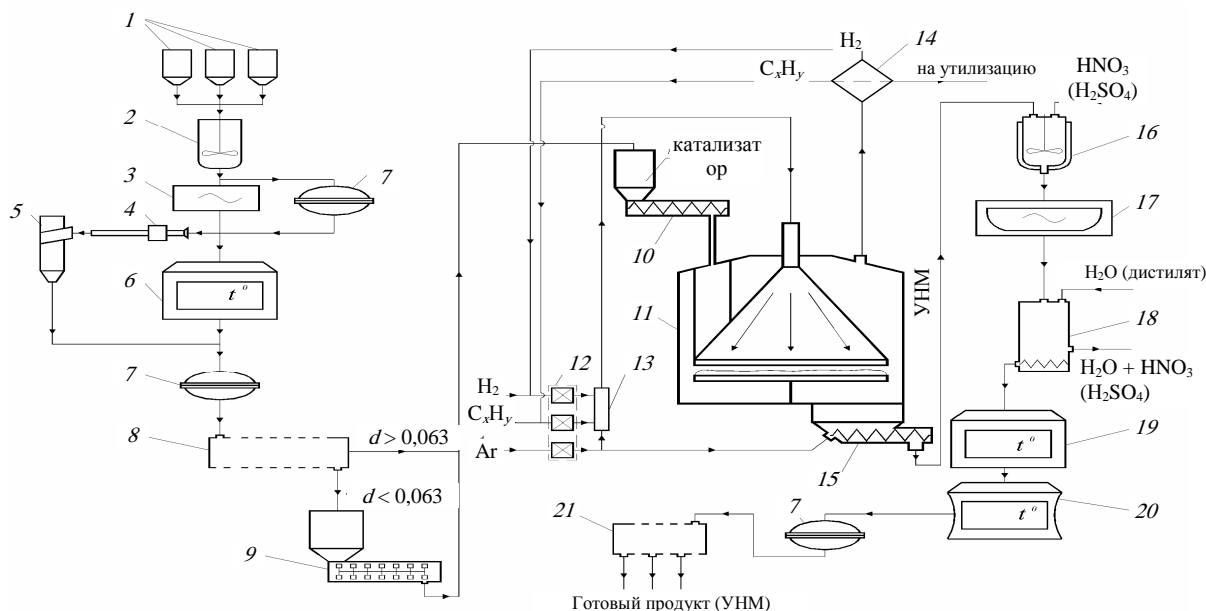
Технологический процесс получения углеродного наноструктурного материала, реализуемого под торговой маркой «Таунит», выполняется в следующей последовательности.

Водные растворы солей (Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O, глицин) соответствующих концентраций, размещённые в ёмкостях 1, смешиваются в аппарате 2 с лопастной мешалкой и далее подаются на обработку в электромагнитном аппарате вихревого слоя (АВС) 7, где в отсутствие ферромагнитных частиц проходят активирование. Далее компоненты катализатора в жидкой фазе подвергаются термической обработке в печи 6, где происходит их последовательное обезвоживание и сжигание при температуре 500 ... 550°C. Диспергирование катализаторной массы производят в АВС в присутствии ферромагнитных (Ni) частиц, после чего подвергают ситовой классификации. Полидисперсный порошок катализатора с размером фракции больше 0,063 мм подают в бункер дозатора 10, а мелкую фракцию гранулируют в роторном высокоскоростном аппарате 9 до получения гранул, превышающих минимально допустимое значение, далее транспортируют в бункер дозатора 10.

Подготовка газовых компонентов синтеза (пропан-бутановая смесь, Ar, H<sub>2</sub>) включает установление заданного расхода, очистку в системе фильтров 12 и, при необходимости, смешение в ёмкости 13.

Приготовленные указанным выше образом исходные реагенты ГФХО синтеза УНМ подаются в соответствии с регламентом процесса в реактор 11, где происходит образование целевого продукта – МУНТ заданной структуры.

На следующем этапе производится очистка продукта от металла (Ni) катализатора в водоподогреваемом аппарате с лопастной мешалкой 17 с помощью 30%-ного раствора HNO<sub>3</sub>. Одновременная загрузка – 600 г УНМ.



**Рис. 16. Технологическая схема получения УНМ в аппарате с неподвижным слоем катализатора:**

- 1 – исходные компоненты катализатора; 2 – смеситель; 3 – ультразвуковой механоактиватор; 4 – аппарат пульсирующего горения (АПГ); 5 – циклон; 6 – печь; 7 – измельчитель (аппарат с вихревым слоем ферромагнитных частиц АВС); 8 – классификатор; 9 – гранулятор; 10 – дозатор катализатора; 11 – реактор синтеза УНМ; 12 – блок фильтров; 13 – смеситель газов; 14 – разделитель газовой смеси; 15 – устройство выгрузки УНМ; 16 – аппарат кислотной отмывки УНМ; 17 – аппарат ультразвуковой отмывки УНМ; 18 – нейтрализатор кислоты; 19 – сушилка; 20 – вакуумная печь; 21 – классификатор готового продукта

Затем осуществляется ультразвуковая обработка суспензии в аппарате проточного типа и отмывка дистиллятом (ЭД-90) в нейтрализаторе 18 до pH = 7.

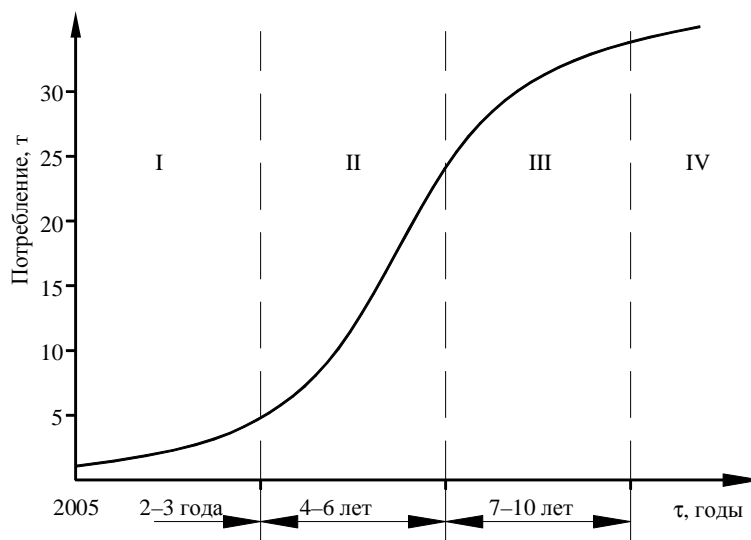
Пастообразный полупродукт поступает далее на сушку в термощкаф 19, диспергируется в АВС, разделяется по фракциям путём газовой или ситовой классификации 21 и упаковывается.

Остановимся подробнее на формировании основных принципов создания главного аппарата – реактора синтеза УНМ. От эффективности его работы зависит обеспечение основных показателей производственного процесса – производительности и качественных характеристик получаемой продукции.

Заданная производительность определяется исходя из того, что широкий спектр областей возможного применения УНМ определяет всё возрастающий спрос на различные фуллереноподобные материалы (нанотрубки, нановолокна, фуллерены и др.). Если ещё несколько лет назад количество этих материалов, фигурирующих на внешнем рынке и получаемых в отечественных лабораториях, исчислялось десятками граммов, то на данный момент ситуация резко меняется. Тенденции роста объёмов закупок и соответственно предложений рынка растут в геометрической прогрессии. Вместе с тем конкретных потребителей, располагающих промышленными технологиями, предусматривающими использование УНМ, к сожалению, в Российской Федерации не так много. Тем не менее, ориентируясь на объёмы внешнего рынка, а, к примеру, в США производится несколько десятков тонн различных УНМ, при этом их экспорт отсутствует, следует предположить, что и отечественная экономика в скором будущем затребуется промышленные объёмы УНМ.

Отсутствие какой-либо достоверной информации, а тем более статистики, связанной с организацией производства УНМ за рубежом, а также сведений о единичной мощности используемых там реакторов не позволяет применить известные – балансовый или статистический методы. С большой долей условности и опираясь на прогнозы ведущих специалистов в области нанотехнологий, нами построена кривая прогнозирования (рис. 17) роста спроса на УНМ на период до 2015 г.

В отличие от классического построения кривой прогнозирования, предусматривающей на III стадии достижение уровня насыщения, а на IV – прекращение или резкое снижение темпов потребления, мы считаем, что рост производства УНМ будет неуклонно расти. В первую очередь это будет происходить за счёт создания принципиально новых форм углеродных наноструктур и создания производств, выпускающих готовые товарные формы, например, модификаторы для полимерных композитов. Применение таких продуктов, адаптированных к применению в конкретном производстве, не будет требовать каких-либо операций по их функционализации (механоактивации, солубилизации и др.),



**Рис. 17. Кривая прогнозирования**

и следовательно, дополнительных расходов на модернизацию уже используемого технологического оборудования. В совокупности с неизбежным снижением цен на УНМ, по мере появления новых производителей и совершенствования технологий их получения это резко увеличит экономическую привлекательность в использовании УНМ, а следовательно, и спрос на УНМ.

На основании вышеуказанных соображений, а также с учётом определённых рисков, связанных с отсутствием в данное время рынка УНМ в Российской Федерации, был установлен объём выпуска УНМ, соответствующий начальной стадии организации индустриального производства – 2000 кг/год. Данная производительность может быть принята в качестве исходной единичной мощности реактора.

### **1.3.2. ЁМКОСТНОЙ РЕАКТОР СИНТЕЗА УНМ С НЕПОДВИЖНЫМ СЛОЕМ КАТАЛИЗАТОРА**

Несмотря на определённую экзотичность синтезируемого продукта, к реакторам для синтеза УНМ можно в полной мере применить известные классификационные признаки химических реакторов, которые позволяют установить единые подходы к методике их проектирования.

Для всех рассматриваемых вариантов осуществления CVD-процесса образования углеродных наноструктур общим является то, что синтез ведётся в нестационарном режиме протекания гетерокаталитических, эндотермических, массообменных процессов, в среде инертных газов. Обязательным условием является наличие в реакционной зоне углеродсодержащих компонентов в газовой фазе.

Отсутствие инвариантности в установлении обозначенных выше признаков реактора связано с обязательными условиями осуществления процесса образования и роста углеродных, табулированных наноструктур из пироуглерода, получаемого при каталитическом разложении углеводородов.

Наиболее приемлемыми вариантами конструктивного оформления реакторов CVD-синтеза УНМ для производства наноуглерода в промышленных объёмах являются:

- непрерывно действующие аппараты трубчатого типа с перемещаемым слоем катализатора;
- реакторы с оживленным слоем катализатора периодического и непрерывного действия;
- ёмкостные реакторы периодического или полунепрерывного принципа действия с неподвижным слоем катализатора.

Во всех этих реакторах предполагается использование мелкодисперсного сыпучего катализатора.

Неоднозначность выбора конкретного типа оборудования объясняется тем, что каждый из них имеет свои очевидные преимущества и недостатки.

Несмотря на кажущуюся привлекательность использования конструктивно простой и технологичной трубчатой формы аппарата, в процессе реального проектирования проявляется целый ряд труднопреодолимых препятствий, которые ставят под сомнение рациональность такого решения.

Так, в условиях осуществления синтеза УНМ в проточных трубчатых реакторах практически невозможно стабилизировать условия синтеза по длине аппарата, что приводит к стохастическому изменению кинетических параметров процесса и, как следствие, неуправляемому варьированию морфологических и иных качественных характеристик, получаемых УНМ.

Для исключения возможного уноса частиц катализатора в трубчатых реакторах устанавливают малые скорости газа, соответствующие ламинарным режимам течения, что часто не обеспечивает оптимальные режимы протекания процесса синтеза УНМ. Кроме того, при ламинарном режиме движения газового потока наблюдается градиент скоростей по сечению аппарата, что приводит к проскоку газа в центральной зоне.

Вариант размещения катализатора на внутренней цилиндрической поверхности трубчатого реактора с его последующим вибротранспортом вдоль реакционной зоны не обеспечивает постоянства толщины слоя и сопровождается соударениями, вызывающими деформацию или частичное разрушение растущих нанотрубок.

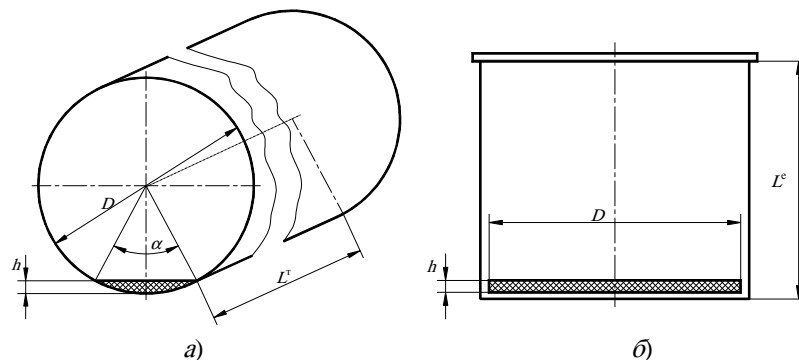
Представляет интерес сравнительный анализ трубчатых и ёмкостных реакторов (рис. 18), в которых рост УНМ происходит в тонком слое сыпучего катализатора. Анализ накопленных исследователями данных позволяет сделать

следующие выводы. Хотя трубчатый и ёмкостной реакторы цилиндрической формы являются наиболее технологичными, с точки зрения изготовления, и обеспечивают равномерные температурные деформации материала конструкции, однако с точки зрения масштабирования и создания промышленных установок с высокой производительностью, более выгодным оказывается использование реакторов ёмкостного типа. В этом случае при высоком выходе готового продукта обеспечивается малый объём реакционной зоны, а следовательно, и габариты реактора. Например, для создания установки производительностью 15 кг/ч реакционная зона трубчатого реактора составляет около 60 м<sup>3</sup>, а для ёмкостного – всего 3 м<sup>3</sup>. При этом не требует доказательств вертикальное исполнение ёмкостного реактора.

Интересен сравнительный анализ вариантов организации условий контактирования порошкообразных катализаторов с газовой фазой в процессе формирования кристаллического наноглерода в аппаратах ёмкостного типа.

Альтернативой неподвижному слою катализатора является его оживённое состояние за счёт восходящих потоков углеродсодержащих газов или вибрационного воздействия.

Способность взвешенных в потоке частиц расходиться друг от друга приводит к саморегулированию и поддержанию постоянства потери напора при изменении скорости потока. При этом значительно



**Рис. 18. Схема размещения катализатора:**

*а* – в трубчатом; *б* – ёмкостном реакторах

увеличивается поверхность контакта взаимодействующих фаз. Интенсивное перемешивание подвижных, обладающих большой объёмной теплоёмкостью, твёрдых частиц катализатора приводит к выравниванию температуры практически по всему объёму даже крупногабаритного аппарата и к высоким значениям коэффициентов теплоотдачи. Это обстоятельство сильно облегчает проведение именно в оживённом слое теплонапряжённых и температурочувствительных процессов, к которым относится CVD-процесс.

Вместе с тем столкновения движущихся частиц катализатора и продуктов синтеза друг с другом и со стенками аппарата приводят к их механическому измельчению и уносу. Увеличение высоты слоя при повышении расхода газа, а также меры, предотвращающие унос мелкой фракции, требуют значительного увеличения общего объёма аппарата. При этом возникает необходимость обеспечения постоянства скорости газа по сечению аппарата, так как в противном случае наблюдается пророск газовых пузырей из-за неравномерности распределения катализатора в реакционном объёме.

Однако наиболее сложная проблема организации CVD-процесса в условиях оживления катализатора связана с тем, что в процессе синтеза УНМ на порядок изменяется объём реакционной массы (пропорционально росту кристаллического наноглерода), а также её физико-механические характеристики (плотность, теплоёмкость, гранулометрический состав и т.д.). Этот факт требует синхронного увеличения расхода газового потока для поддержания режима оживления, что не позволяет обеспечить стабильность технологических параметров, оптимальных с точки зрения качества УНМ, и усложняет процессы контроля и управления синтезом.

Таким образом, не ставя под сомнение потенциальную возможность использования аппаратов с оживённым слоем катализатора для получения УНМ в больших объёмах, в качестве первого шага к созданию промышленного производства представляется более целесообразным использование реакторов с неподвижным слоем катализатора.

Данное решение существенно влияет на выбор варианта организации CVD-процесса с позиций установления способа подвода сырья (катализатор + углеводород) и отвода готового продукта (УНМ). Очевидно, что организовать работу реактора в непрерывном режиме в этом случае невозможно. Что касается периодического процесса, то его реализация несомненно упрощает конструкцию реактора, но не выдерживает критики, с точки зрения достигаемой производительности.

Обеспечение периодической подачи катализатора в зону реакции и выгрузки готового продукта без разгерметизации аппарата и охлаждения реакционной зоны до предпиролизной (500°C) температуры позволило сделать выбор в пользу полунепрерывного режима организации работы реактора.

Важным, с точки зрения стабильности эндотермического процесса, является выбор способа обеспечения температурных условий синтеза УНМ. В известных конструкциях реакторов, в особенности трубчатого типа, используется наружный обогрев корпуса как наиболее просто реализуемый. При этом тепло от наружной стенки корпуса передаётся преимущественно конвективным путём к газовой среде и в меньшей степени – катализатору кондуктивным и терморadiационным путями.

Достоинством такого способа является высокая удельная (на единицу объёма реакционного пространства) площадь поверхности теплообмена. Недостаток – преимущественный обогрев углеродсодержащих газов, вызывающий объёмный пиролиз, провоцирующий образование сажи, загрязняющей УНМ.

В связи с вышеизложенным, внешний обогрев реактора ёмкостного типа представляется нерациональным. Более эффективным является размещение нагревательных элементов внутри реактора, обеспечивающее, в основном, терморadiационный теплоподвод (вследствие более высокой температуры и меньшей наружной поверхности нагревателей, чем при обогреваемом корпусе). При этом возможен преимущественный обогрев катализатора, а не газовой среды, что позволяет осуществить термический пиролиз вблизи поверхности катализатора, имеющего более высокую температуру, чем

окружающая газовая среда. Эти обстоятельства способствуют снижению общих энергозатрат на получение УНМ и, как следствие, уменьшению их себестоимости.

Таким образом, согласно классификационным признакам единой номенклатуры типовых химических реакторов, установлено, что на начальном этапе перехода от лабораторных к промышленным технологиям CVD-синтеза УНМ наиболее рациональным является использование:

- ёмкостных, цилиндрических аппаратов вертикального исполнения;
- неподвижного слоя мелкодисперсного сыпучего катализатора;
- полунепрерывного режима работы;
- размещения нагревательных элементов внутри реактора.

Реализуемая в реакторе технология получения углеродных наноструктурных образований поликристаллического углерода предусматривает каталитический пиролиз углеродсодержащей смеси. Диффундируя через слой мелкодисперсного катализатора, углеводород сорбируется на поверхности наноразмерных частиц металла катализатора, где протекает целый ряд последующих химических реакций, конечными продуктами которых являются углерод и водород. При достижении необходимой концентрации углерод графитизируется в форме нитевидных образований (углеродных нанотрубок).

На основании результатов экспериментов и аналитических расчётов установлены рекомендуемые параметры CVD синтеза УНМ:

- температура 620 ... 650°C;
- давление – атмосферное;
- толщина слоя катализатора < 0,001 м;
- состав катализатора: Ni/Mg/Y;
- размер частиц катализатора > 0,06 мм;
- инертная среда – Ar;
- состав газовой смеси: 70% бутана, 30% пропана (в случае рецикла – H<sub>2</sub>);
- расход газовой смеси – 500 л/ч;
- время процесса синтеза УНМ – до 30 мин.

В цилиндрическом реакторе ёмкостного типа, вертикального исполнения реализуются гетерокаталитические, эндотермические, массообменные процессы в среде инертных газов при неподвижном слое периодически загружаемого в реактор катализатора и внутреннем обогреве реакционной зоны.

На рисунке 19 показана схема реактора с указанием внутренних устройств.

Работа реактора включает в себя следующие стадии:

- 1) продувка инертным газом (Ar);
  - 2) напыление катализатора *б*, сопровождаемое поворотом диска-подложки *4* на угол 315°;
  - 3) нагрев реакционной зоны до температуры 630 ... 650°C нагревателями *3*;
  - 4) подача углеродсодержащей газовой смеси через штуцер *9*;
  - 5) пиролиз углеводорода, сопровождаемый синтезом УНМ;
  - 6) выгрузка готового материала с помощью скребка *11* при вращении диска-подложки *4* без разгерметизации аппарата.
- Далее повторение цикла при выполнении п. 2, 4, 5, 6.

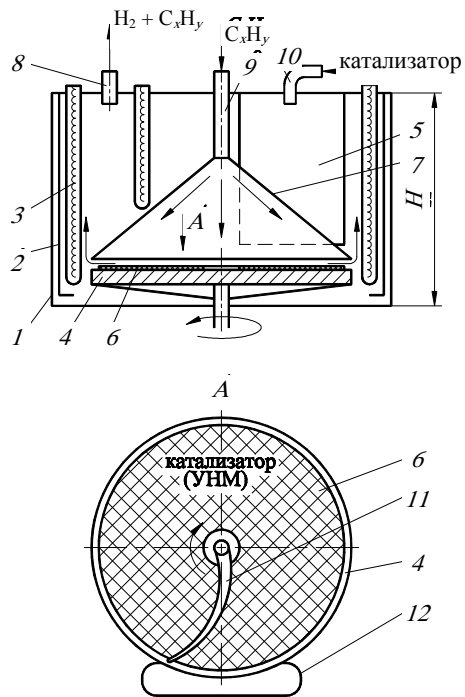
Таким образом, в реакторе реализуется полунепрерывный режим работы. Количество последовательно выполненных циклов синтеза ограничивается только объёмом бункера (если его периодическая выгрузка не предусмотрена) и лимитируется необходимостью периодической профилактики всех систем аппарата (очистка реакционной зоны, продувка магистралей и запорной арматуры и т.д.), которая оговаривается в технологическом регламенте эксплуатации реактора.

На рисунке 20 представлена фотография опытно-промышленного реактора производительностью 2000 кг/год, сконструированного на основе вышеизложенной методики расчёта основных технологических и конструктивных параметров.

Полученный материал представляет собой наномасштабные нитевидные образования поликристаллического графита в виде многослойных пакетированных нанотрубок с преимущественно конической формой графеновых слоёв. Товарная форма УНТ выпускается в виде агломератов микрометрических размеров.

На рисунке 21 представлена микрофотография материала, а в табл. 1 – основные характеристики полученных УНМ.

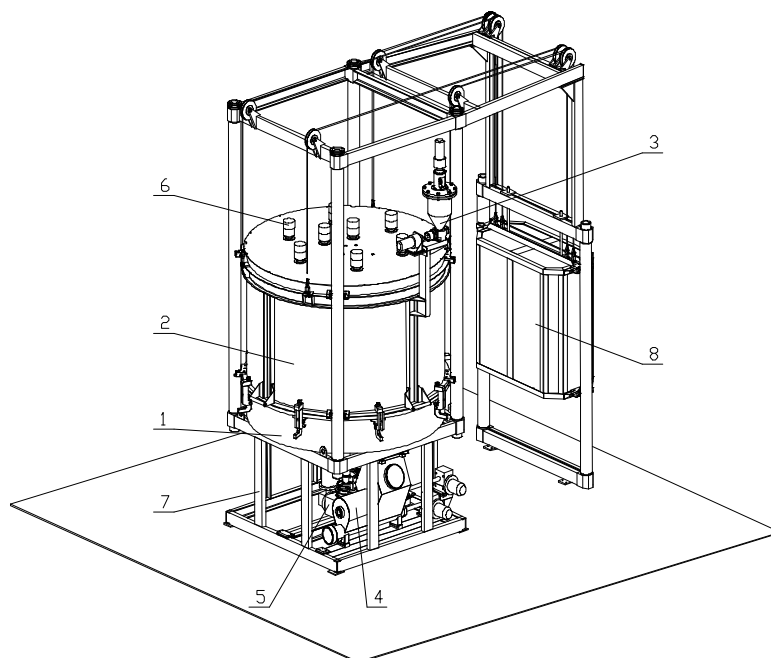
В настоящее время полученный наноматериал, реализуемый под торговой маркой «Таунит», проходит стадию исследования на предмет использования в различных областях, в более чем 120 научных организациях и предприятиях Российской Федерации и за рубежом.



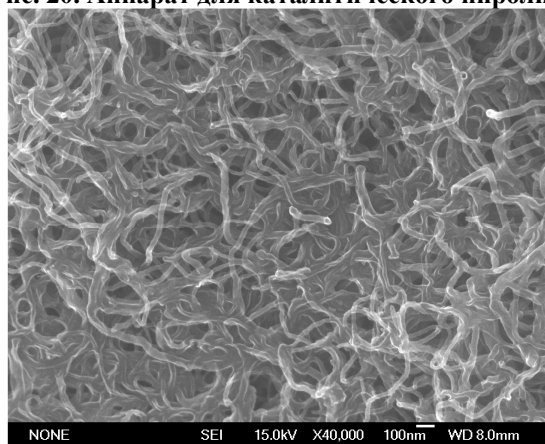
**Рис. 19. Схема реактора:**

1 – корпус; 2 – экран; 3 – нагревательный элемент; 4 – диск-подложка; 5 – корпус камеры осаждения; 6 – слой катализатора; 7 – газораспределитель; 8 – штуцер отвода продуктов пиролиза; 9 – штуцер подвода углеродсодержащих газов; 10 – распылитель катализатора; 11 – скребок; 12 – сборник продукта





**Рис. 20. Аппарат для каталитического пиролиза**



**Рис. 21. Микроструктура УНМ, полученных в промышленном реакторе (СЭМ)**

### 1. Характеристики УНМ

Характеристика	Значение
Наружный диаметр, нм	10 ... 60
Внутренний диаметр, нм	10 ... 20
Длина, мкм	2 и более
Общий объем примесей, %, в том числе аморфный углерод	до 1,5 0,3 ... 0,5
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,4 ... 0,5
Удельная геометрическая поверхность, м <sup>2</sup> /г	120 и более
Термостабильность, °С	до 700
Средний объем пор, см <sup>3</sup> /г	0,22



## 2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ НАНОИНДУСТРИИ

### 2.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АППАРАТОСТРОЕНИЯ КАК ОСНОВЫ НАНОИНДУСТРИИ

Становление в России инновационной экономики требует перехода от лабораторных и пилотных установок по производству наноматериалов к выпуску промышленных аппаратов и оборудования.

Аппаратостроение занимается производством аппаратов, сосудов и других листовых сварных конструкций, имеющих ёмкостную часть преимущественно в форме оболочки вращения, т.е. форму большинства видов оборудования, востребованных в наноиндустрии (как было показано в части 1).

Также крупными потребителями аппаратуры являются нефтепереработка, нефтехимия, химическая и нефтегазодобывающая отрасли промышленности, где на долю ёмкостного оборудования сейчас приходится не менее 3/4 объёма всего технологического оборудования.

Сосуды и аппараты, как правило, состоят из ёмкостной части, имеют запорно-регулирующую арматуру, соединительные трубные детали, опоры и подвески. Производство всех этих изделий и входит в отрасль аппаратостроения.

Для аппаратостроения наиболее характерным является единичное или мелкосерийное производство с частой сменой изделий.

Из-за больших размеров и массы аппаратов часто их изготовление выполняется на одном рабочем месте по принципу подачи оборудования и инструментов к обрабатываемой детали. Крановое оборудование выполняет не только подъёмно-транспортные функции, но и производственно-технологические – кантователей, позиционером.

При изготовлении крупногабаритных аппаратов используется как стационарное оборудование (прессы, гибочные вальцы, металлорежущие станки), так и передвижные установки, например, автоматы для сварки, пневматический инструмент, нагревательные приборы и др.

Указанные условия создают специфику производства и позволяют характеризовать аппаратостроение, как самостоятельную отрасль тяжёлого машиностроения.

Основными изделиями заводов аппаратостроения являются аппараты, сосуды, трубопроводы.

**Аппарат** представляет собой изделие, состоящее из герметически закрытой ёмкости, имеющей внутренние устройства, предназначенные для осуществления физико-химических процессов. В производстве используют:

а) *массообменные аппараты*, в которых передача тепла происходит при непосредственном контакте сред;

б) *гидродинамические аппараты* предназначены для реализации процессов перемешивания, разделения жидких и газовых сред и очистки продуктов от примесей (пылеуловители, газосепараторы, выветриватели и др.);

в) *тепловые аппараты*, в которых тепловой поток проходит через стенку, разделяющую среды (теплообменники, аппараты воздушного охлаждения, конденсаторы и т.д.);

г) *химические аппараты-реакторы*, в них происходят разнообразные химические реакции (реакторы, регенераторы, реакционные камеры и т.д.), в том числе и реакция синтеза УНМ.

**Сосуд** – работающая под давлением герметически закрытая ёмкость, предназначенная для ведения физико-химических процессов, а также для хранения и перевозки сжатых, сжиженных и растворённых газов и жидкостей. В отличие от аппарата сосуд не имеет внутренних устройств. Ёмкости бывают шаровые, цилиндрические, в виде баллонов и т.д.

**Трубопроводы.** Преимущественно изготавливают технологические трубопроводы, т.е. такие, по которым транспортируются вещества, обеспечивающие проведение технологического процесса и эксплуатацию оборудования. Они состоят из соединённых между собой прямых или криволинейных участков, деталей трубопроводов, контрольно-измерительных приборов, крепёжных материалов (болтов, шпилек, гаек), прокладок и уплотнений. Детали трубопроводов – это характерные изделия аппаратостроительных предприятий: отводы, фланцы, тройники, заглушки, переходы, компенсаторы, арматура, опоры и подвески.

Несмотря на разнообразие параметров выпускаемых аппаратов, в их конструкции имеется много стандартных деталей, например: отбортованные эллиптические днища, фланцы, компенсаторы, арматура.

Относительное постоянство формы аппаратов – цилиндрическая; стабильность технологических маршрутов изготовления для большинства деталей; повторяемость операций на определённом оборудовании – всё это создаёт предпосылки для внедрения комплексной механизации и автоматизации, универсальной оснастки оборудования, принципов агрегатирования.

В современных условиях развития рыночных отношений между предприятиями, выпускающими аппараты, и потребителями продукции можно выделить основные направления развития отрасли аппаратостроения:

– повышение качества и надёжности оборудования;

– создание и выпуск аппаратуры, имеющей минимальную энергоёмкость и энергосберегающую технологию изготовления;

– уменьшение металлоёмкости и массогабаритных характеристик (сейчас коэффициент использования металла колеблется в интервале 0,6 ... 0,8);

– применение новейших материалов, в том числе многослойных (биметаллов) и неметаллических;

– всемерное внедрение методов поверхностного упрочнения и нанесение защитных покрытий – как средство повышения коррозионной стойкости, износостойкости и сопротивления усталости материала изделий;

– повышение производительности труда за счёт использования современного оборудования, в том числе роботоманипуляторов и станков с ЧПУ.

## 2.1.1. ЗАГОТОВКИ ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ НАНОИНДУСТРИИ

**Заготовка** – предмет, из которого путём изменения формы, размеров, шероховатости поверхности и свойств материала изготавливают деталь или неразъемную сборочную единицу.

В аппаратостроении в качестве заготовок применяется главным образом *прокат* (листовой, сортовой и специальный). Штампованные, штампо-сварные заготовки, в свою очередь, также изготавливают из проката. Находят ограниченное применение литые и кованные заготовки.

*Листовой прокат.* Основной вид проката, применяемый для изготовления элементов ёмкостной части аппаратов (обечаяк и днищ), деталей внутренних устройств – тарелок, перегородок, решёток.

Листовой прокат изготавливают методами холодной и горячей прокатки. Согласно сортаменту на холодноотянутый прокат листы выполняют толщиной 0,35 ... 5,0 мм, шириной 500 ... 2350 мм, длиной 1000 ... 6000 мм.

Наибольшее употребление находит горячекатанный листовой прокат: толщина листов 0,4 ... 160 мм, длина листов до 12000 мм, ширина листов до 3800 мм.

*Двухслойный прокат.* Этот вид проката находит также распространённое применение в аппаратостроении, выпускается по сортаменту согласно ГОСТ. Имеет размеры по толщине 4 ... 60 мм, ширине 1200 ... 2800 мм, длине 3200 ... 9400 мм.

*Трубы.* Трубный прокат применяется в конструкциях печей, теплообменников, технологических трубопроводов, в качестве патрубков аппаратов.

Для изготовления аппаратов применяются следующие виды труб:

– трубы бесшовные холоднодеформированные с наружным диаметром  $D_n = 5 \dots 250$  мм. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные  $D_n = 20 \dots 820$  мм;

– трубы бесшовные стальные. Имеют повышенную точность после холодного предела и после горячей прокатки,  $D_n = 25 \dots 710$  мм;

– трубы бесшовные холодно-, тепло- и горячедеформированные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности

$D_n = 20 \dots 114$  мм;

– трубы бесшовные холодно- и теплодеформированные из коррозионностойкой стали  $D_n = 5 \dots 273$  мм;

– трубы сварные стальные водогазопроводные  $D_n = 10,2 \dots 165,0$  мм;

– трубы стальные электросварные прямошовные  $D_n = 10 \dots 1420$  мм;

– трубы стальные электросварные со спиральным швом  $D_n = 159 \dots 2520$  мм.

Во всех стандартах на трубы содержатся допуски на размер наружного диаметра труб и другие специфические размерные и геометрические параметры. Все трубы, в зависимости от пожеланий заказчика, поставляются немерной, мерной и кратной мерной длины.

*Сортовой прокат.* Для изготовления аппаратов используется сортовая горячекатанная сталь, применяемая в виде:

– полос (полосовая сталь) шириной 11 ... 200 мм, толщиной 4 ... 60 мм;

– круглого сечения диаметром 5 ... 270 мм;

– квадратного сечения размерами сторон квадрата 6 ... 260 мм;

– равнополочных уголков с номерами профиля 2 ... 25;

– уголков неравнополочных с номерами профиля 2,5/1,6 ... 20/12,5;

– швеллеров с номерами профиля 5 ... 40;

– двутавров с номерами профиля 10 ... 60.

*Заготовки кованные.* Выпускаются круглого сечения диаметром 40 ... 200 мм, квадратного сечения сторонами 20 ... 400 мм, горячекатанные квадратные 40 ... 230 мм, калиброванные квадратные 3 ... 100 мм, калиброванные круглые 3 ... 100 мм, качественные круглые со специальной отделкой поверхности 0,2 ... 56 мм, полосовая сталь горячекатанная и кованная толщиной 3 ... 800 мм, шириной 12 ... 300 мм, горячекатанная шестигранная длиной стороны 8 ... 100 мм, калиброванная шестигранная 8 ... 100 мм.

*Заготовки прессованные.* Выпускаются в виде различных профилей: фасонные горячепрессованные в виде полого квадрата толщиной стенки  $S$  более 5 мм, диаметром описанной окружности  $D = 30 \dots 130$  мм; из алюминия и алюминиевых сплавов  $S > 1$ ,  $D = 30 \dots 350$ ; из магниевых сплавов  $S > 1$ ,  $D =$  до 150; конструкционные из титановых сплавов  $S > 2$ ,  $D =$  до 200.

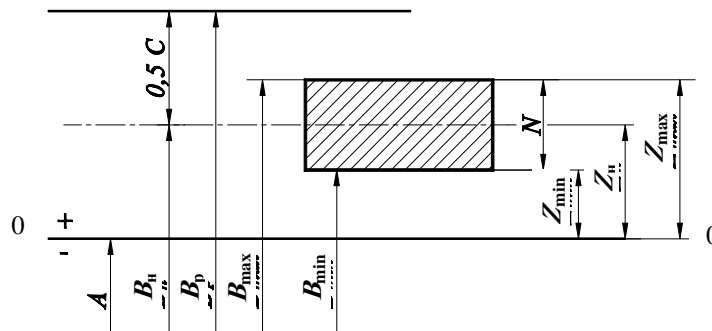
*Заготовки литые.* Слитки непрерывно-литые, квадратные и прямоугольные толщиной 8 ... 400 мм, шириной 80 ... 500 мм, длиной 2500 ... 12000 мм. Слитки: электрошлакового переплава диаметром  $D = 1130 \dots 1680$  мм, длиной  $L = 2550 \dots 3750$  мм; вакуумно-дугового переплава  $D = 620 \dots 1310$  мм,  $L = 4000 \dots 5000$  мм; отливаемые в вакууме  $D = 1385 \dots 3150$  мм,  $L = 3670 \dots 7330$  мм.

Кузнечные слитки  $D = 457 \dots 2160$  мм,  $L = 1255 \dots 6736$  мм; восьмигранные  $D = 435 \dots 2226$  мм,  $L = 1800 \dots 6760$  мм; слитки плазменно-дугового переплава  $D = 148 \dots 247$  мм,  $L = 1000$  мм и электронно-лучевой плавки  $D = 247 \dots 375$  мм,  $L = 1200$  мм.

## 2.1.2. ПРИПУСКИ И ОПЕРАЦИОННЫЕ ДОПУСКИ НА ОБРАБОТКУ ЗАГОТОВОК ИЗ ПРОКАТА

При выполнении операции резания для раскроя листового материала и последующей механической обработке размеры заготовок определяются с учётом соответствующих операционных припусков.

Использование газопламенных, электродуговых и газозлектрических методов обработки (резки) металла сопряжено с учётом припусков на потери металла вследствие окисления в струе кислорода, плавления и сгорания. Это определяет специфику вопроса о припусках на обработку и допусках для заготовок из проката в производстве сварных конструкций.



**Рис. 22. Припуски, допуски и предельные размеры заготовок  
(для наружных размеров)**

Припуском на обработку является слой металла, удаляемый с поверхности заготовки снятием стружки, окислением и плавлением. Различают промежуточные и общие припуски. При обработке листового проката применяют симметричные припуски, необходимые для получения параллельных, противоположащих плоских поверхностей кромок заготовок.

Размер развертки на плоскости  $A$  является основным для определения номинального размера  $B_n$  заготовки до механической обработки.

Номинальный размер симметричного припуска обозначим  $Z_n$ . Для внешних поверхностей (контуров) заготовки

$$B_n = A + 2Z_n.$$

Для внутренних поверхностей заготовки

$$B_n = A - 2Z_n.$$

В общем виде

$$B_n = A \pm 2Z_n.$$

Применение кислородной и других видов резки приводит к новой модификации размера  $B_p$  разметки. Для внешних и внутренних поверхностей в общем виде

$$B_p = B_n + C,$$

где  $C$  – слой металла, окисляемого в струе кислорода или выплавляемого.

Таким образом,

$$B_p = A \pm (2Z_n + C).$$

Из формул видно, что  $2Z_n$  и  $C$  порознь можно рассматривать как промежуточные припуски, а  $(2Z_n + C)$  – как общий припуск на обработку заготовки.

Допуск на размер припуска  $N$  определяется полем допуска заготовки или разностью предельных размеров необработанной заготовки.

Отклонение от заданного размера определяется допуском на размер (операционный допуск). Погрешности геометрической формы (эллиптичность, непараллельность противоположащих кромок) должны находиться в пределах поля допуска на размер заготовки. Для устранения погрешности размера необходимо учитывать отклонения на предшествующей операции или переходе. Таким образом, припуск  $Z_n$  на выполняемую операцию или переход должен быть не менее операционного допуска  $\delta_{оп}$  для предшествующей операции или перехода:

$$2Z_n > \delta_{оп}.$$

На последнем переходе или последней операции обработки заготовки операционные допуски не следует устанавливать более узкими, чем допуски на размеры готовых деталей.

В общих случаях определения припусков учитываются также погрешности установки, базирования и закрепления заготовки для выполняемой операции.

Симметричный припуск на обработку

$$2Z_n = 2\delta_{оп}(R_Z + m + e),$$

где  $\delta_{оп}$  – операционный допуск на размер заготовки;  $m$  – толщина слоя, структура и свойства которого изменились за допускаемые пределы под воздействием термического цикла, механического или иного воздействия;  $R_Z$  – высота неровностей, характеризующих шероховатость поверхности;  $e$  – отклонение от прямой линии профиля обработанной грани.

Если рассматриваемая операция является единственной, например, по копиру на станках, то  $\delta_{оп} = 0$ , тогда

$$2Z_n = 2(R_Z + m + e).$$

Для наружных поверхностей заготовок наибольший предельный размер заготовки определяют на предшествующей операции как сумму наибольшего предельного размера на последующей смежной операции и соответствующего припуска.

Наименьшие предельные размеры определяют как разность наибольшего предельного размера и соответствующего операционного допуска.

Для внутренних поверхностей целесообразно рассчитывать прежде всего наименьшие предельные размеры заготовок как разность соответствующих размеров и припусков, а затем наибольшие предельные размеры как суммы соответствующих наибольших предельных размеров и допусков.

Предельные размеры, припуски и допуски вычисляют с равной точностью, с округлением размеров заготовки в сторону их увеличения (для аппаратостроения до 0,5 и 1,0 мм).

Расчёт припусков и технологические требования, предъявляемые при операционном контроле, предусматривают операционные допуски, т.е. допуски размеров заготовок по операциям (переходам).

В аппаратостроении вопрос о создании нормативов на операционные допуски представляет интерес для ряда технологических операций: разметки, резки на листовых ножницах, кислородной и других видов термической резки и обработки кромок, обработки на кромкострогальных, гибочных и иных станках.

## 2.2. ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

### 2.2.1. ПРАВКА

Основная технологическая задача правки заключается в устранении волнистости и коробоватости проката. В металлообработке под волнистостью понимают вид отклонений геометрических параметров, занимающий промежуточное положение между отклонениями формы и шероховатостью поверхности. Коробоватость – это волнистость во взаимоперпендикулярных направлениях.

Эти погрешности количественно оцениваются стрелой прогиба на 1 м длины проката.

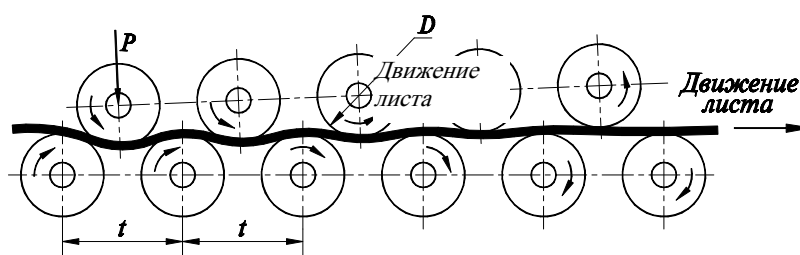
Волнистость может служить первопричиной потери устойчивости аппаратов, в особенности работающих под действием наружного давления.

Допускаемая стрела прогиба листового проката после правки, отвечающая принципам взаимозаменяемости, должна составлять не более 1 мм на 1 м длины. Поэтому прокат, особенно с профилем малой жёсткости, подвергают правке.

Правка представляет собой разновидность обработки металлов давлением и осуществляется путём многократного знакопеременного пластического изгиба обрабатываемого металла при напряжениях, превышающих предел текучести.

Выполняется правка на многовалковых листопрямильных машинах. Заготовка пропускается между двумя рядами валков, расположенных в шахматном порядке.

Нижний ряд приводной, верхний ряд валков вращается за счёт сил трения и имеет возможность вертикального перемещения, т.е. регулирования давления на лист. Число валков нечётное – 5 ... 11. Правку проводят в 3 ... 5 проходов при прямом и обратном ходах (реверсивное движение). Скорость подачи 0,06 ... 1,5 м/с.



**Рис. 23. Схема работы многовалковой листопрямильной машины**

Для правки тонких листов число роликов увеличивают, обеспечивая при этом «мягкие» режимы деформации. Шаг роликов  $t$  выбирают из ряда:  $t = 200; 250; 400; 450$  мм.

Диаметр ролика  $D = (0,9 \dots 0,95)t$ . С уменьшением  $t$  точность правки возрастает.

### 2. Значение шага и количества роликов в зависимости от толщины листа

Толщина листа, мм	4 ... 6	4 ... 10	6 ... 16	12 ... 25	10 ... 32	20 ... 32	18 ... 50
Шаг роликов, мм ( $t$ )	200	200	250	300	400	450	550
Количество роликов	9	9	9	9	7	7	7

Усилие правки  $P$  в листопрямильных машинах рассчитывают по максимальной допустимой силе, приложенной к одному ролику, МПа:

$$P = \frac{b\sigma_n s}{15t},$$

где  $b$  – ширина листа, м;  $s$  – толщина листа, м;  $\sigma_n$  – временное сопротивление изгибу, МПа;  $t$  – шаг роликов, м.

Находят применение в практике также комбинированные способы правки, при которых совмещаются в одной операции несколько простых технологических схем правки:

- 1) растяжение с нагревом;
- 2) нагрев с растяжением и сжатием в разных плоскостях;
- 3) растяжение с изгибом;
- 4) сжатие с растяжением в разных плоскостях.

Растяжением правят полосы шириной до 200 мм, а также листы толщиной до 16 мм, имеющие винтообразность и серповидность, которые трудно устранить правкой на роликовых машинах. Данный способ правки позволяет получить точность формы листа в пределах 1 ... 2 мм на 1 м, а при необходимости до 0,15 мм на 1 метр длины заготовки.

Правку сортового проката производят на машинах с консольными роликами, работающими по тому же принципу.

При толщине листа  $s > 40$  мм его предварительно нагревают.

Реже используют правку на прессах, а также ручную правку молотком с круглым бойком.

Контроль правки осуществляется специальным шупом при помощи линейки.

## 2.2.2. ОЧИСТКА

В результате прокатки, выполнения горячей штамповки и других высокотемпературных операций на поверхности заготовок образуется окалина. За время транспортирования, хранения на металле могут появиться ржавчина и загрязнения.

Цель очистки – удаление с поверхности металла указанных выше загрязнений.

Обязательной очистке подлежат:

- кромки свариваемых элементов;
- участки металла, соприкасающиеся с флюсом;
- поверхности контакта соединяемых элементов (внахлестку и куда приваривается обкладка);
- поверхности отдельных деталей и аппаратов в целом, подлежащие окраске, эмалированию, гуммированию, металлизации и т.п.

В промышленности используют многочисленные способы очистки металлических поверхностей от загрязнений, которые можно объединить в следующие группы: химические, физические и механические методы.

**Химические методы обработки** поверхности включают обезжиривание, травление, а также применение модификаторов ржавчины.

Обезжириванием называют процесс растворения или эмульгирования жира и масел с помощью химически активных веществ. Осуществляется промывкой деталей в щелочных растворах, органических растворителях, водных моющих средствах, а в некоторых случаях электрическим травлением в гальванических ваннах.

Обезжиривание мелких деталей производят в ваннах или во вращающихся барабанах, в которые залив растворитель.

Крупные изделия обезжиривают путём заливки растворителя во внутреннюю полость герметически закрытого аппарата. Внешнюю поверхность крупногабаритных аппаратов можно обезжиривать путём протирки растворителем или его распылением.

После щелочного обезжиривания и электрического травления должна быть произведена тщательная промывка поверхности водой и сушка.

Травление выполняется обычно слабыми растворами серной и соляной кислот в отдельности или сочетании. Наибольшая скорость травления достигается в 25%-ной серной и 20%-ной соляной кислоте.

Скорость травления увеличивается также с повышением температуры растворов.

На рисунке 24 показан один из вариантов схемы участка химической очистки поверхности металла.

В последнее время разработано или преобразователей ржавчины,

После травления поверхность промывают водой и просушивают.

Химическая очистка – с весьма неблагоприятными применением его на предприятиях невозможно добиться требуемого

### **Физические методы обработки**

Из физических методов наиболее термические способы очистки. 150°C, что не вызывает структурных происходит вследствие различия окислов металла. При нагреве результате окалина растрескивается и окислов удаляют металлическими газопламенной очистки, когда нагрев смонтированной на роликовых

Ограниченное применение в следующие физические методы

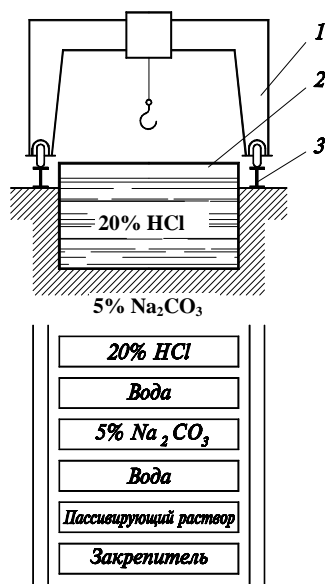


Рис. 24. Химическая очистка заготовок:

1 – подъемное устройство;  
2 – ванна; 3 – рельсовый путь

вариантов схемы участка химической очистки

множество составов, композитов, модификаторов часто на основе ортофосфорной кислоты.

металла нейтрализуют щелочными растворами,

дорогостоящий и экологически вредный процесс условиями труда исполнителей. Поэтому носит вынужденный характер в том случае, когда результата другими средствами. поверхностей.

широкое применение в аппаратостроении находят Поверхность нагревается до температуры ≈ превращений в металле. Отделение окалины коэффициентов линейного расширения стали и происходит обезвоживание ржавчины. В легко отслаивается вместе с ржавчиной. Остатки щётками. Наиболее распространён способ выполняется многопламенной горелкой, опорах.

связи с высокой стоимостью оборудования имеют очистки: ультразвуковая, обработка взрывом,

электроискровая, плазменноабразивная, лазерная.

**Механические способы очистки.** В промышленности для обработки поверхности широко используют вращающиеся металлические щётки, у которых в качестве рабочих элементов используют металлическую проволоку диаметром 0,2 ... 0,8 мм, соединённую в пучки и размещённую между фланцами (рис. 25).

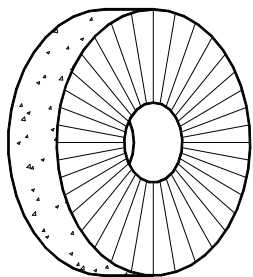


Рис. 25. Дисковые щётки

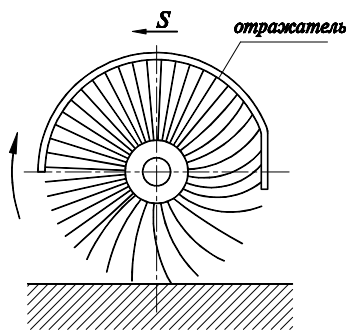


Рис. 26. Щётка с отражателем

Режим обработки этими щётками: скорость обработки 15 ... 45 м/с, скорость подачи (лимитируемая исходным состоянием поверхности) от 0,5 до 30 м/мин и более, натяг 0,5 ... 5,0 мм.

Для повышения энергии удара проволочных элементов на линии атаки разработаны вращающиеся щётки с отражателями (рис. 26), в которых проволочные элементы во время холостого пробега дополнительно аккумулируют энергию за счёт их упругого изгиба при контактировании с отражателем переменного диаметра.

Для увеличения энергии удара проволочек на линии атаки разработаны секционные щётки, где рабочие проволочные элементы расположены по окружности секционно (рис. 27). Для обработки больших по площади поверхностей используют валковые (цилиндрические) щётки длиной 50 ... 1500 мм и наружным диаметром 50 ... 1000 мм.

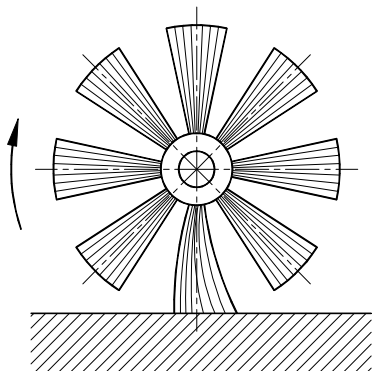


Рис. 27. Секционная щётка

Для выполнения работ по очистке поверхности от ржавчины и т.п. часто используют торцовые (чашечные) щётки, которые имеют большую прочность и позволяют вести обработку на скоростях 30 ... 60 м/с. В большинстве случаев их применяют для обработки внутренних поверхностей, а также для обработки дна деталей типа стаканов.

Одним из направлений использования проволочек в качестве рабочих элементов является обработка ленточными щётками. К основанию щётки прикрепляют колодки с набором проволочных рабочих элементов.

Для зачистки кромок свариваемых элементов, а также снятия усиления сварного шва широко используются абразивные круги и иглофрезы (рис. 28).

В основе иглофрезерной обработки металлов лежит эффект сосредоточенного суммарного силового воздействия упругоизогнутых проволочных элементов иглофрезы на обрабатываемую поверхность металла.

В настоящее время разработан и используется новый способ иглофрезерования (рис. 29), который заключается в прижиге с натягом к обрабатываемой поверхности продольно перемещающейся детали 1 вращающейся иглофрезы 2 с ворсом из стальных пружинных элементов 3 и пазами на рабочей поверхности. Расположенные в пазах треугольного профиля ворса нерабочие проволочные элементы 4 имеют меньший диаметр и большую плотность набивки, чем рабочие проволочные элементы. В результате усиливается эффект их упругого отжатия нерабочими проволочными элементами, увеличивается сосредоточенное суммарное силовое воздействие рабочих проволочных элементов на обрабатываемую поверхность металла, что в конечном итоге повышает производительность и качество обработки.

Ворсом иглофрезы служит стальная пружинная проволока диаметром 0,3 ... 0,9 мм (материал – сталь 60Г). Пазы треугольного профиля с углом 90 ... 120° у вершины могут быть расположены на рабочей поверхности проволочного ворса как параллельно оси вращения иглофрезы, так и под углом наклона к ней.

Большинство способов механической обработки устраняют или локализуют на поверхности металла концентраторы напряжений в виде рисок, царапин, что значительно повышает механическую прочность и защиту их от коррозионного растрескивания.

**Галтовка.** При этом виде обработки детали в течение нескольких часов, беспорядочно перемещаясь во вращающемся барабане, трются

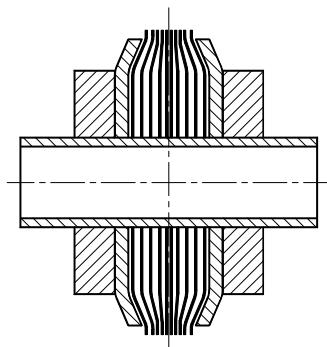


Рис. 28. Иголфреза

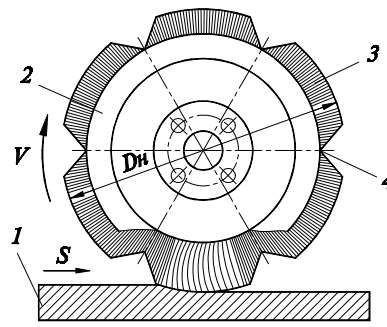


Рис. 29. Иголфреза с пазами

друг о друга, очищая при этом свои поверхности от окислов и загрязнений. Вместе с деталями в барабан загружают известняк, гравий, песок, металлические шарики, ролики, обрезки металла, в некоторых случаях небольшие количества слабых растворов кислот, щелочей, специальные активаторы. Время обработки – 2 ... 6 часов в реверсивном режиме.

*Пескоструйная очистка* состоит в обработке поверхностей струёй сжатого воздуха, в которой находятся частички кварцевого песка.

Величина давления для стальных изделий составляет 0,18 ... 0,22 МПа, скорость струи при истечении из сопла распыливающего аппарата достигает 360 м/с.

Поверхность изделий после обработки песком приобретает равномерную шероховатость и становится матовой; она легко корродирует и загрязняется, поэтому следует максимально сократить промежуток времени до нанесения антикоррозионного покрытия, т.е. до проведения пассивации.

Крупным недостатком пескоструйной очистки является образование большого количества пыли. Этот недостаток в некоторой степени устраняется гидрокескоструйной очисткой, где очистку производят пульпой – смесью песка и воды.

*Дробеструйная очистка.* Вместо кварцевого или металлического песка применяют мелкую чугунную или стальную дробь, имеющую диаметр от 0,5 до 2 мм.

*Дробемётная очистка.* Вместо пневматических распылительных устройств применяют дробеметные установки, в которых струя абразивного материала (скорость до 60 м/с) создаётся под действием центробежной силы, возникающей при вращении турбинки.

После проведения очистки в обязательном порядке производят пассивацию растворами ингибиторов (замедлителей) коррозии, а также токопроводящими грунтами. В качестве пассиватора часто применяют олинол (25 г/л).

Пассивирующий слой не должен оказывать влияние на качество сварного шва и позволяет обеспечить межоперационный срок хранения листов и листовых заготовок до 6 – 8 месяцев.

### 2.2.3. РАЗМЕТКА И РАСКРОЙ

**Разметкой** называется операция, состоящая в нанесении на поверхность заготовки размерных точек или линий с учётом припусков.

Нанесение контуров геометрических фигур выполняется известными из планометрии методами.

Криволинейные контуры строятся по координатным точкам (рис. 30). Разметка начинается с выбора измерительной базы, в качестве которой может быть осевая линия или одна из сторон листа проката. Не рекомендуется вести разметку, последовательно отмеряя отрезки от точки к точке, так как это приводит к накоплению ошибки.

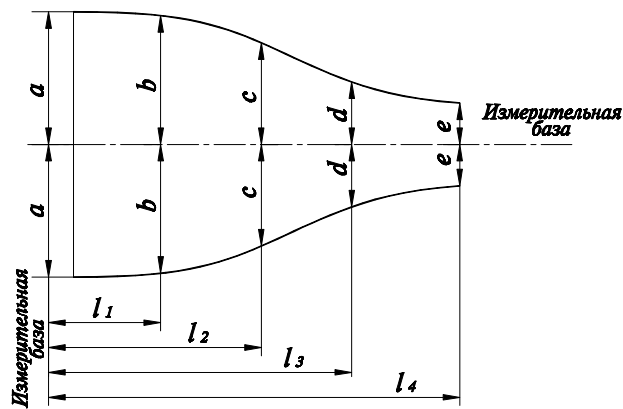
**Наметкой (копированием)** называется нанесение на заготовку формы и размеров по шаблону. Наметка применяется при серийном изготовлении деталей вместо индивидуальной разметки. При разметке применяются различные измерительные и специальные разметочные инструменты (штангенциркули, рейсмусы, кронциркули, линейки, угломеры и др.).

Поверхность металла перед разметкой рекомендуется покрывать тонким слоем мелового раствора, смешанного с льняным маслом, клеем или водным раствором медного купороса.

Разметочные линии прокернивают или обозначают чертилкой. При разметке ширина и глубина линий должна быть не более 0,3 мм. Расстояние между кернами на линиях контура деталей должно быть 20 мм. Линии вырезов фиксируют кернением с расстоянием между кернами – 5 ... 10 мм. Кернение допускается только по линии реза.

Безразметочное изготовление заготовок используют при вырезке непосредственно по шаблонам или копирным щитам, установленным на газорезательных машинах; на газорезательных машинах, оснащённых масштабной дистанционной фотокопировальной системой управления, а также в машинах с программным управлением.

Фотопроеционный (оптический) метод разметки позволяет использовать в качестве шаблона чертёж контура, который фотографируется, а затем воспроизводится на плоскости размечаемой детали через проекционный аппарат, в котором точно устанавливается масштаб увеличения. По световым линиям выполняется разметка (рис. 31).



**Рис. 30. Разметка криволинейного контура**

**Раскрой** – способ расположения заготовок деталей на материале. Различают следующие способы раскроя:

- а) индивидуальный – при котором материал разрезается на части для изготовления одноимённых деталей;
- б) смешанный – когда из листа вырезают комплект деталей, необходимый для изготовления конкретного изделия;
- в) групповой – характеризуется тем, что вначале вырезают крупные заготовки, затем средние и мелкие (применяется только в единичном производстве). Экономичность раскроя характеризуется коэффициентом использования материала

$$\eta_p = \frac{G_d}{H_d} \cdot 100 \%,$$

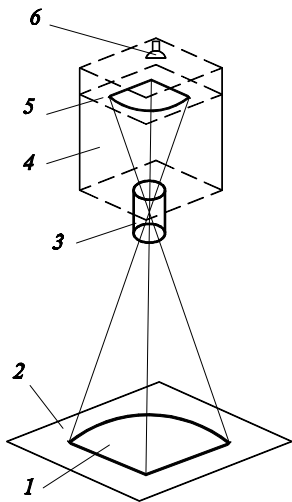
где  $G_d$  – чистый вес детали;  $H_d$  – норма расхода материала на деталь.

На практике  $\eta_p = 88 \dots 92 \%$ .

Для изготовления корпусных деталей крупногабаритных аппаратов используют *карты раскроя* – чертёж развёртки на плоскости, который определяет количество и габаритные размеры листов-заготовок, расположение и протяжённость продольных и поперечных швов.

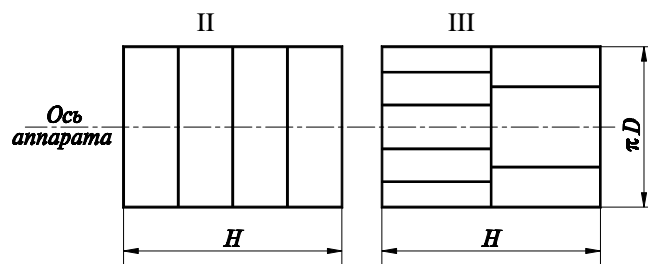
На практике при изготовлении корпусов аппаратов используют два принципиально разных типа карт раскроя:

I тип – *метод обечаек*, при котором продольная ось листа располагается перпендикулярно оси аппарата (рис. 32).



**Рис. 31. Фотопроеционный метод разметки:**

- 1 – проектируемое изображение в натуральную величину;
- 2 – лист металла;
- 3 – объектив;
- 4 – проектор;
- 5 – негатив;
- 6 – источник света



**Рис. 32. Карты раскроя**

В этом случае сборочный узел (корпус) составляется из отдельных обечаек, каждая из которых по возможности изготавливается из отдельного листа.

II тип – *метод карт*, для которого характерно продольное расположение листов относительно оси аппарата.

Каждый из рассматриваемых методов имеет свои преимущества и недостатки.

При использовании метода обечаек увеличивается количество кольцевых швов – менее нагруженных, но более трудоёмких. Проще в этом случае производить гибку обечаек на машинах с небольшой длиной валков.

Метод карт предусматривает использование листов с максимальной длиной, что естественно уменьшает количество кольцевых швов, но увеличивает число продольных, выполняемых на плоскости, а значит, и более технологичных. При этом отклонение по периметру получается наибольшими, а по высоте корпуса  $H$  – минимальные. Однако требуются валцы большой мощности, а длина валков достигает 12 м.

Из практики делается вывод о прогрессивности метода карт вследствие более качественных сварных соединений, однако, решение о выборе метода для конкретного изделия требует сравнительных расчётов, а поиск оптимального решения – применение возможностей ЭВМ.

При раскрое листов должен соблюдаться ряд требований. Расположение сварных продольных и поперечных швов в обечайках и трубах, а также швов приварки днищ, штуцеров, люков и т.д. должно позволять проведение визуального осмотра швов, контроля их качества и устранение дефектов. Допускается не более одного шва (замыкающего), доступного визуальному контролю только с одной стороны. Сварные швы не должны перекрываться опорами.



## 2.2.4. РЕЗКА ЗАГОТОВОК

Операция резки необходима для раскроя заготовок согласно заданной развёртке. Её осуществляют методами механической (холодной) и термической резки.

Механическая резка осуществляется без снятия стружки на гильотинных и дисковых ножницах, а также на ножницах для резания сортового проката. Резка со снятием стружки выполняется на металлорежущих станках и дисковыми пилами.

Резка на ножницах обладает самой высокой производительностью. Однако применение этого вида резки возможно только до толщин 60 мм. Стоимость оборудования для холодной резки с увеличением толщины проката резко возрастает.

В аппаратостроении широко применяются гильотинные ножницы с параллельными и наклонными ножами (рис. 33). Резание происходит за счёт развития ножами напряжений сдвига. Усилие для развития сдвига металла  $P_c$  определяется по формуле

$$P_c = \tau F,$$

где  $\tau$  – предел прочности материала на срез;  $F$  – площадь резания.

$$\tau = (0,7 \dots 0,8) \sigma_B,$$

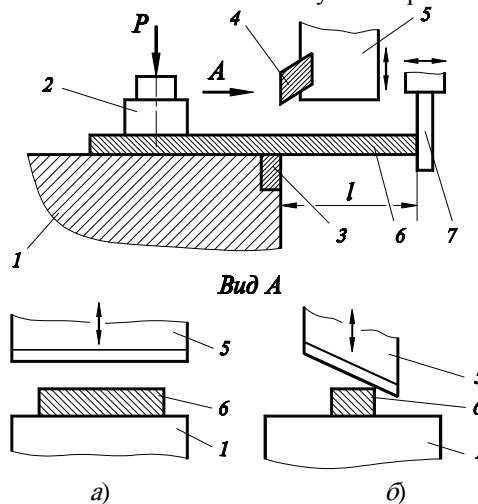
где  $\sigma_B$  – предел прочности на растяжение.

Учитывая увеличение силы трения из-за износа ножей и имеющийся зазор между ними, требуемое  $P_c$  выбирают в 1,5 ... 1,8 раза больше расчётного.

В машиностроительной практике используют ножницы двух типов: с наклонными и прямыми ножами. Выбор типа ножниц зависит от толщины заготовки ( $S$ ). Этот геометрический параметр так же определяет зазор ( $b$ ) между ножами.

$S$  до 10 мм –  $b = 0,07$  мм;  $S$  от 10 до 20 мм –  $b = 0,08$  мм;  $S$  от 20 до 24 мм –  $b = 0,1$  мм.

Наличие зазора между ножами приводит к изгибу заготовки, что, в свою очередь, вызывает повреждения металла на кромках. Образуются развитые трещины наклёпанного слоя. Поэтому после резки



**Рис. 33. Схемы работы гильотинных ножниц:**

а) с параллельными ножами; б) с наклонными ножами;

1 – стол; 2 – прижимы пневматические; 3 – нижний нож; 4 – верхний нож;

5 – подвижная траверса; 6 – заготовка; 7 – упор

предусматривается снятие повреждённого слоя на металлорежущих станках. Припуск на механическую обработку составляет  $Z_n = 0,25S$ , но не менее 3 мм.

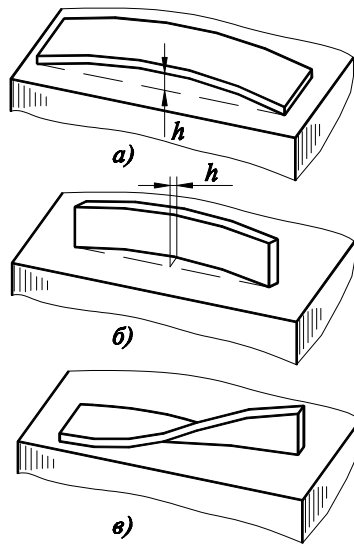
Если после резки на ножницах производится сварка, то механическая обработка является необязательной, так как наклёпанные кромки проплавляются вместе с металлом шва.

Для резки листов с образованием скошенных кромок применяют наклонные плиты, которые устанавливают на направляющие ножниц. Угол наклона должен быть не более  $25 \dots 30^\circ$  во избежание соскальзывания листов.

Дефекты, возникающие при резке проката ножницами, выражаются в виде искривлений по длине правильной (дугобразной) и «неправильной» формы. Следует отметить, что величина дефекта связана с размерами отделяемой части материала – чем меньше эта часть, тем значительнее дефекты.

При правильном искривлении по всей длине отрезанная полоса изогнута в одной плоскости и радиус дуги изгиба приблизительно постоянен (рис. 34 а, б).

Численной характеристикой кривизны является стрела прогиба  $h$ . При неправильной кривизне полосы наблюдается различная кривизна у отдельных участков, причём, эти участки могут быть расположены в различных плоскостях. Примером такого дефекта может служить скручивание полосы вокруг продольной оси (рис. 34, в).



**Рис. 34. Дефекты при резке листового проката**

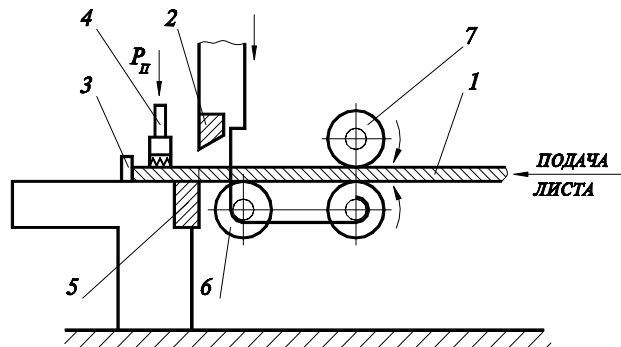
Допускаемое отклонение от прямолинейности при резании на ножницах составляет  $h = 0,05 \dots 0,08$  мм на 1 м ножа.

Значительному снижению дефектов формы отрезаемой полосы способствует применение принципиально нового способа для резки проката (рис. 35).

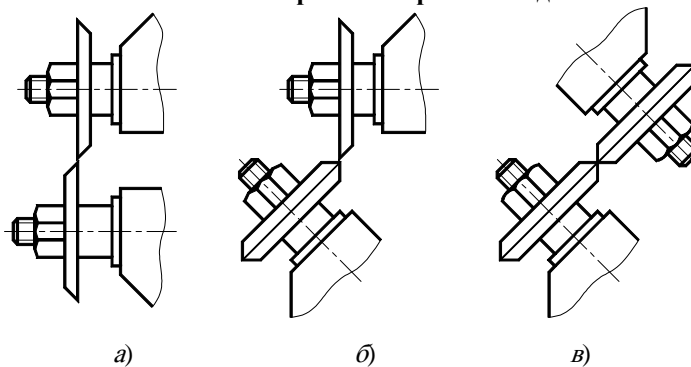
Способ резки листового проката заключается в следующем. Разрезаемый лист *1* подают со стороны подвижного ножа *2* до упора *3*. Перед приложением сдвигающего усилия отрезаемую часть листа фиксируют прижимом *4* к неподвижному ножу *5* и отрезают подвижным ножом *2*. Оставшуюся часть листа, переместившись вниз в процессе резки, возвращают механизмом *6, 7* в исходное положение. Способ предусматривает полное фиксирование отрезаемой части, что позволяет практически устранить её коробление. Подачу листа осуществляют при соблюдении следующих условий: отрезаемая часть располагается на жёстком или упругом основании и поднимается к ножу по всей длине или в отдельных точках; та часть листа, от которой отрезается заготовка, перемещается таким образом, чтобы не препятствовать движению подвижного ножа, и фиксируется сверху и снизу с помощью устройств, обеспечивающих безопасность обслуживания.

По сравнению с традиционным способом резки на гильотинных ножницах, рассмотренный выше позволяет изменить стрелу прогиба  $h$  заготовки в 5 – 10 раз и практически исключить её коробление и саблевидность.

Кроме гильотинных в аппаратостроении применяются дисковые ножницы и ножницы для резки сортового проката. Дисковые ножницы имеют ножи круглой формы. По способу расположения ножей они делятся на три типа (рис. 36): с прямым расположением ножей (*а*), с одним наклонно расположенным ножом (*б*) и с двумя наклонно расположенными ножами (*в*).



**Рис. 35. Схема резки с обратной подачей листа**



**Рис. 36. Типы дисковых ножниц**

Технические характеристики двудисковых ножниц представлены в табл. 3.

### 3. Основные технические характеристики двудисковых горизонтальных ножниц

Техническая характеристика	Модели ножниц					
	H441 2	H450	H4414A	H451	H4556	H4420
Наибольшая толщина разрезаемого материала, мм	1,0	2,0	2,5	32	6,3	10
Наибольший диаметр круговой вырезки, мм	2000	2100	2840	2100	2100	2200

Схема работы ножниц показана на рис. 37. Как следует из рисунка, ножницы предназначены не только для прямой, круговой и фигурной резки, но и для отбортовки, гибки листового материала, получения косо́го реза.

Для фасонной обработки (резки, гибки, формовки, прорезки жалюзи и т.д.) широко используют высечные ножницы (рис. 38).

Привод таких ножниц обеспечивает от 750 до 1400 двойных ходов в минуту. Толщина разрезаемого металла до 6 мм. Для резки сортового проката применяют специальные ножи гильотинных ножниц, а также ножницы с овальным ножом (рис. 39).

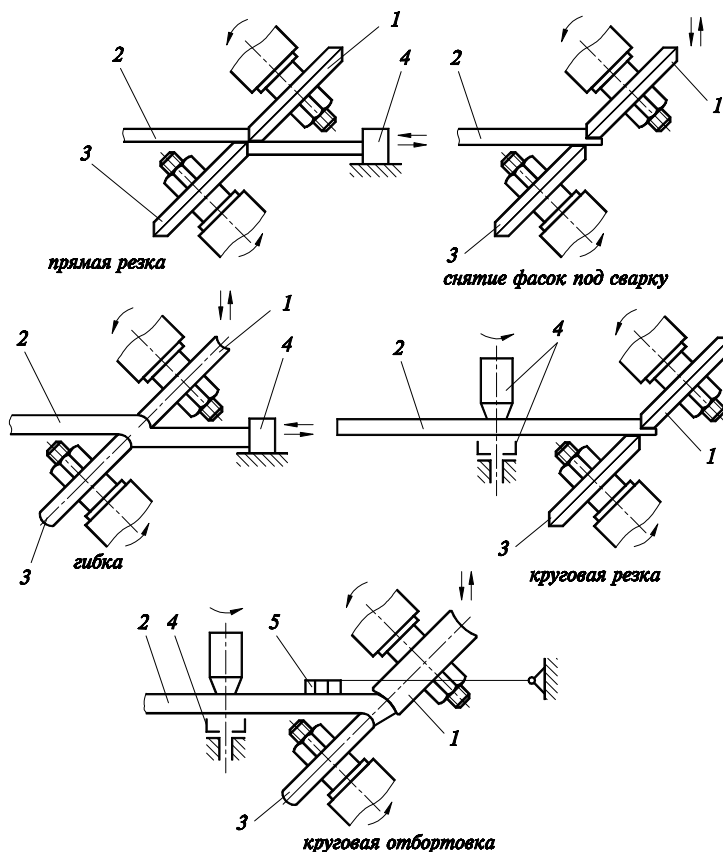


Рис. 37. Схема работы дисковых ножниц:

1 – верхний нож; 2 – лист; 3 – нижний нож; 4 – упор; 5 – уровень

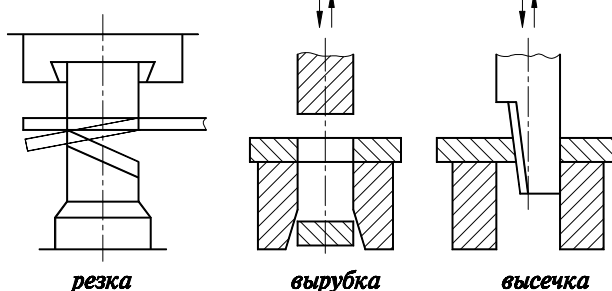


Рис. 38. Схема работы высечных ножниц

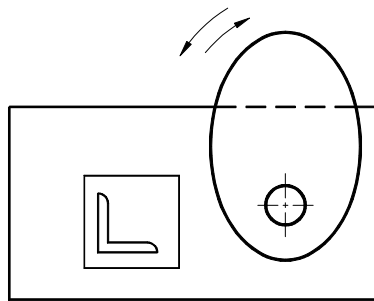
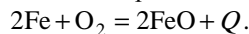


Рис. 39. Ножницы с овальным ножом

В ножницах для резания сортового проката неподвижный нож имеет сменное гнездо, профиль которого соответствует профилю разрезаемого металла. Находят применение также дисковые пилы, вулканиковые круги (для тугоплавких металлов).

Из числа термических способов резки в аппаратостроительных цехах самое широкое распространение находит кислородная резка (рис. 40).

Кислородная резка основана на том, что разрезаемый металл подогревается до температуры, при которой он сгорает в струе кислорода. Сгорание металла представляет химический процесс и протекает по реакции



Процесс идёт с выделением тепла. Продукты окисления выбрасываются под действием кинетической энергии струи кислорода. В качестве горючих газов применяются ацетилен, пропан, природный газ. При резке около 70% тепла выделяется при сгорании металла в кислороде и только 30% подводится от подогревающего пламени.

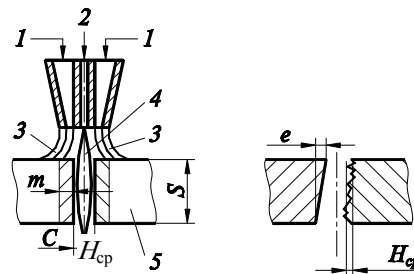


Рис. 40. Схема кислородной резки:

1 – горючий газ + кислород; 2 – режущий кислород; 3 – подогревающее пламя (1000 ... 1200°C); 4 – режущее пламя; 5 – заготовка

Припуски на обработку. Слой металла, окисляемого и сгораемого при резке,  $C$  определяется по формуле

$$C = 2 + 0,025S, \text{ мм},$$

где  $S$  – толщина заготовки, мм.

Припуск на обработку после кислородной резки  $Z_n$  определяют:

$$Z_n = H_{cp} + m + e,$$

где  $H_{cp}$  – средняя высота неровностей после кислородной резки. В инженерных расчётах  $H_{cp}$  определяется как  $H_{cp} = 0,1 + 0,01S$  мм;  $m$  – протяжённость зоны термического влияния с изменённой структурой, её величина зависит от химического состава стали и параметров резки. Определяется по следующей зависимости:  $m = 0,625 + 0,03S$  мм;  $e$  – отклонение от прямолинейности. По данным практики

$$e = 0,1 + 0,02S \text{ мм}.$$

Отсюда

$$Z_n = 0,825 + 0,06S, \text{ мм}.$$

Практически,  $Z_n$  принимается не менее 3 мм.

Кислородная резка применяется для раскроя низколегированных, а иногда среднелегированных сталей, имеющих феррито-перлитную структуру.

**Кислородно-флюсовая резка.** Сущность заключается в том, что в струю режущего кислорода дополнительно подаётся порошкообразный флюс.

Флюс состоит из железного порошка (65 ... 95%) и специальных добавок: феррофосфора, алюминиевого порошка, окалины и кварцевого песка.

Подаваемый к месту реза флюс при сгорании выделяет дополнительное количество тепла, тепловая мощность пламени увеличивается более чем в два раза, что

**Воздушно-дуговая резка** относится к расплавлению металла 1 (рис. 41) горячей между угольным или графитным электродом 2 и металлом 1, с непрерывным удалением жидкого металла струёй на совместном действии тепла дуги и которого способствует удалению

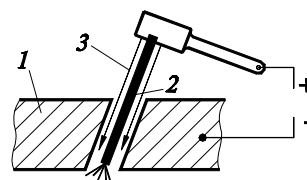


Рис. 41. Воздушно-дуговая резка

способствует расплавлению тугоплавких окислов. числу газозлектрических способов резки. Сущность 41) в месте реза теплом электрической дуги, электродом 2 и металлом 1, с непрерывным сжатого воздуха 3. Таким образом, способ основан потока сжатого воздуха, кинетическая энергия продуктов сгорания.

При резке применяют постоянный ток обратной полярности. Давление воздуха в пределах 0,5 МПа. Поверхность металла в месте разреза получается достаточно ровной и гладкой.

Воздушно-дуговой способ может быть использован для поверхностной и разделительной резки нержавеющей стали, чугуна, латуни, трудноокисляемых сплавов толщиной до 20 ... 25 мм.

Используется также для вырезки дефектных участков сварных швов, пробивки отверстий, отрезки прибылей стального литья.

**Плазменная резка.** Плазма – это четвёртое состояние вещества, представляющее собой сильно ионизированный газ, содержащий примерно одинаковые количества положительно заряженных частиц.

Для получения струи плазмы в целях резки используется газоразрядное устройство, называемое плазмотроном, где рабочий газ (водород, азот, аргон, гелий или смеси) превращается в плазму в дуговом разряде между электродами.

Данный способ применяют для резки алюминия, нержавеющей стали, меди и неэлектропроводных материалов, так как разрезаемое изделие не включается в электрическую цепь дуги.

Наиболее эффективно резка протекает при использовании в качестве плазмообразующей среды смеси газов, состоящей из 80% аргона и 20% азота.

Рез получается очень узкий с шириной  $C = 0,1 \dots 0,2$  мм. Скорость резания – 2 ... 3 м/мин (в 3 – 10 раз выше, чем при кислородной резке).

**Воздушно-плазменная резка.** В качестве плазмообразующего газа используется сжатый воздух.

Преимущества воздушно-плазменной резки по сравнению с механизированной кислородной и плазменной в инертных газах следующие: простота процесса резки; применение недорогого плазмообразующего газа-воздуха; высокая чистота реза; пониженная степень деформации, меньшая ширина реза; более устойчивый процесс, чем при резке в водородосодержащих смесях.

Область применения – для раскроя углеродистых, низколегированных и легированных сталей, а также цветных металлов толщиной до 80 мм. При этом скорость резки возрастает в 2–3 раза по сравнению с газокислородной резкой.

**Резка лазерным лучом.** Лазер – англ. laser (составлена из первых букв фразы Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление света с помощью индуцированного излучения).

За счёт накачки внешней энергии (электрической, световой, тепловой, химической) атомы активного вещества-излучателя переходят в возбуждённое состояние. Возбуждённый атом излучает энергию в виде фотона. В отрасли используются твердотельные лазеры. В качестве активного вещества служит оптическое стекло с примесью неодима и редкоземельных элементов.

Преимуществом лазерного луча является возможность передачи энергии на большие расстояния неконтактным способом. Это позволяет использовать лазерный луч не только для резки, сварки, но и для разметки. Лазерная технология по праву считается прогрессивной, наукоёмкой и её применение в машиностроении нужно квалифицировать как направление обеспечения научно-технического прогресса.

## 2.2.5. ОБРАБОТКА КРОМОК

Кромки свариваемых элементов обрабатывают для получения заданной геометрической формы и обеспечения операционных допусков, путём удаления слоя металла с изменёнными структурой и свойствами.

Обработка кромок выполняется на металлорежущих станках, термическими и электрическими способами резки.

Разделку кромок целесообразно совмещать с операцией раскроя, если последующая механическая обработка является необязательной.

Данные операции проводятся на станках различных типов в зависимости от формы обрабатываемой поверхности. Прямолинейные кромки листов значительной длины обрабатывают на специальных кромкострогальных станках, кромки тел вращения – на токарных станках (лобовых, карусельных).

Кромкострогальные станки (рис. 42, а) имеют два суппорта, установленных на общей каретке и работающих попеременно при прямом и обратном ходе. В этом преимущество кромкострогальных станков по сравнению со строгальными станками, у которых обратный ход не используется.

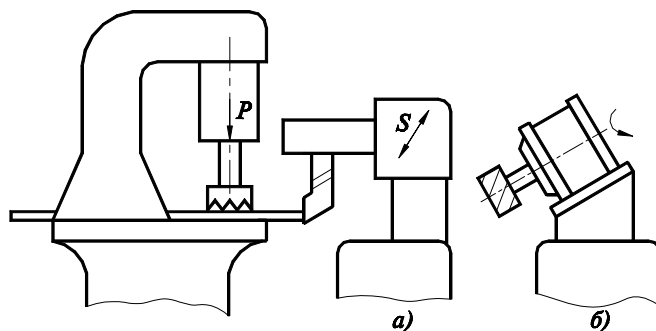


Рис. 42. Схемы работы кромкострогального (а) и кромкофрезерного (б) станков

Более производительным является способ обработки кромок на кромкофрезерных станках (рис. 42, б). В этом случае в качестве инструмента используется торцевая фреза, установленная непосредственно на головке электродвигателя, закреплённого на поворотном столе.

В условиях единичного производства также применяют:

- а) пневматические молотки;
- б) механические и ручные напильники;
- в) пневмо- и электрошлифмашины.

Для обработки кромок (рис. 43, а – е) можно использовать и оборудование для разделительной резки, например, кислородную. Количество переходов в этом случае зависит от количества отрезков ломаной линии, определяющих профиль кромки. Так, для Х-образных швов с притуплением – в три перехода (рис. 43, г).

Профиль разделки кромок зависит от вида применяемой сварки, материала и от толщины заготовки.

Специфической операцией, предшествующей круговой гибке листовой заготовки на вальцах, является *подгибка кромок*. Проводится для устранения угловатости, возникающей при гибке обечаек (рис. 44). Необходимость и величина подгибки кромок зависит от требуемой точности профиля и используемого листогибочного оборудования. Подгибку кромок проводят следующими способами (рис. 45, а – г).

С целью компенсации снижения прочностных свойств материала в зоне термического влияния сварного соединения листовой конструкции проводят предварительное утолщение свариваемых кромок.

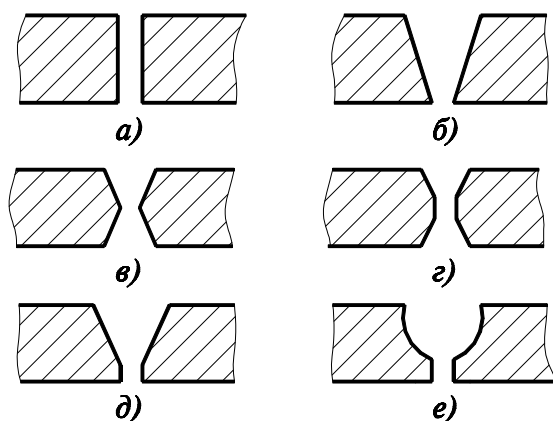


Рис. 43. Форма разделки кромок под сварку

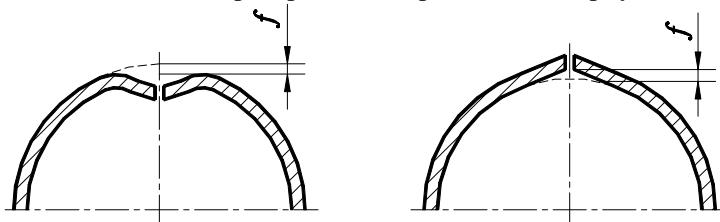


Рис. 44. Дефекты кромок при гибке

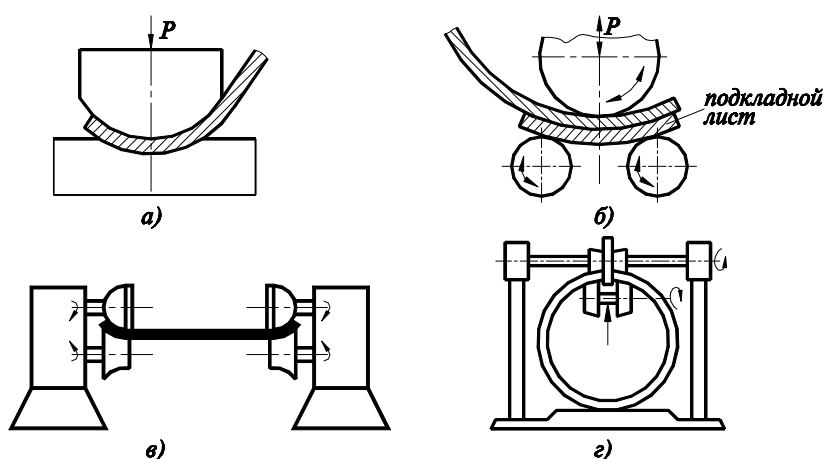
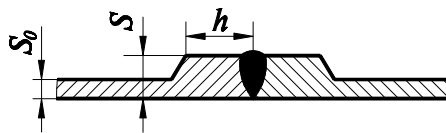


Рис. 45. Способы подгибки кромок:

- а – в штампе на прессе; б – в 3-х валковой машине;
- в – на кромкогибочной машине; г – после вальцовки на деформовочной машине

Установлено, что значение утолщения для большинства конструкционных материалов лежит в пределах  $S/S_0 = 1,2 \dots 1,6$  мм (рис. 46). Для алюминия и его сплавов  $S/S_0 = 1,3 \dots 1,8$ . Ширина зоны утолщения  $h/S_0 = 5 \dots 10$ .



**Рис. 46. Параметры утолщения кромок**

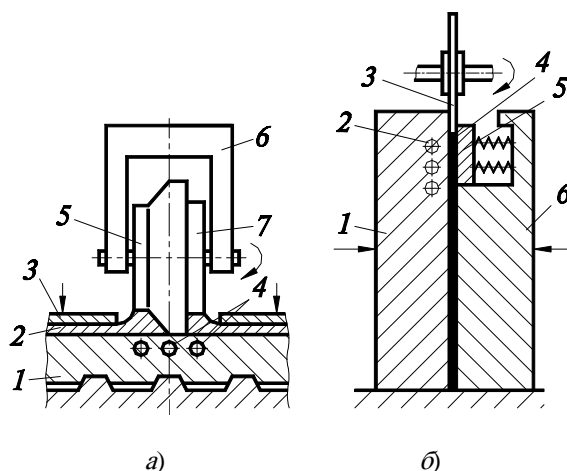
Наиболее целесообразной формой утолщения в поперечном сечении является трапециевидная.

В практике применяют следующие способы утолщения кромок листовых заготовок:

- а) путём создания нормального усилия к поверхности листовой заготовки;
- б) деформированием торцевой поверхности листа.

Схема устройства, реализующего первый способ, приведена на рис. 47, а.

Листовую заготовку 2 фиксируют прижимами 3 на предварительно нагретой электронагревателями 4 до заданной температуры плите 1, имеющей свободу перемещения в горизонтальном направлении. Плиту устанавливают на стол фрезерного станка, а к его суппорту крепят П-образную оправку 6 с формообразующими роликами 5 и 7 (число формообразующих роликов зависит от материала листовой заготовки, её толщины, размеров заданного утолщения и может составлять один, два и более). Формообразующие ролики перед прокаткой предварительно нагревают до заданной температуры. Нормальным усилием ролики прижимаются к поверхности листовой заготовки, и при перемещении стола осуществляется её прокатка. Рабочий профиль роликов и последовательность их установки обеспечивают образование утолщения заданного профиля и требуемой величины путём постепенного вытеснения металла из средней части в зону утолщения. После образования утолщения листовую заготовку разрезают и удаляют полосу невыдавленного материала.



**Рис. 47. Схемы работы устройств для утолщения кромок**

Рабочую зону нагревают приблизительно до 400°С. Ширина ролика 8 ... 12 мм, число проходов – 6 – 8. Толщина невыдавленного металла ≈ 0,1 мм.

Создать утолщение вторым способом можно используя установку (рис. 47, б), которая обеспечивает утолщение кромки листовой заготовки 4, устанавливаемой между плитами 1 и 6, путём её последовательной осадки деформирующим роликом 3 (или несколькими роликами). Для предотвращения образования гофр и обеспечения равномерного утолщения применяют пружиненный элемент противодействия 5. В зоне утолщающейся кромки устанавливают индуктор 2, предназначенный для нагрева кромки заготовки до оптимальной температуры.

### 2.2.6. ГИБКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК

В технологическом процессе изготовления аппаратуры гибка относится к числу основных формоизменяющих операций. Гибке подвергают листовую, сортовой прокат и трубы. Формоизменение при гибке осуществляется путём пластического деформирования металла. Эта деформация протекает различно с каждой стороны заготовки. Слои металла внутри угла сгиба сжимаются и укорачиваются в продольном и растягиваются в поперечном направлениях. Наружные слои растягиваются и удлиняются в продольном и сжимаются в поперечном направлении. Гибочные операции главным образом осуществляют в холодном состоянии. Гибку в горячем состоянии применяют лишь в тех случаях, когда становится невозможным применение холодной гибки.

Основными соображениями выбора того или иного вида операции являются степень пластического деформирования металла при гибке и необходимая для этого мощность гибочного оборудования.

Гибку в холодном состоянии применяют в пределах, не допускающих критической степени деформаций (3 ... 15%). Это положение определяет допускаемые соотношения между толщиной заготовки и радиусомгиба для операций холодной гибки.

Допускаемый радиусгибки в холодном состоянии

$$R \geq (20 \dots 25) S,$$

где  $S$  – толщина проката.

Если  $R \leq (20 \dots 25) S$ , то необходимо применение горячей операциигибки с температуройнагрева выше порога рекристаллизации металла.

Для гибки тонкого (до 5 мм) листа предназначаются двухвалковые машины. На рисунке 48 показана схема работы гибочного станка с упором заданного радиуса.

В конструкции валцов (рис. 49) стальной, а нижний – большего диаметра и покрыт гуммированием, он не обладает пористостью, и обладает также высокой

Преимущества двухвалковых машин: поверхность при гибке, подгибка листов различной толщины без

**Гибка на вальцах.** Простейшим симметричная машина (рис. 50). неподвижной осью вращения. Верхний для получения требуемого радиуса перемещением верхнего валка, и для из рабочего состояния.

Заданный радиус гибки реверсивном движении валков. ограничена силой сцепления

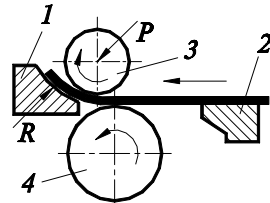
Основной недостаток конец заготовки длиной, равной нижних валков ( $0,5 O_1 O_2$ ), остаётся приходится на средний верхний валок, выполняется как самостоятельная

Машины с асимметричным проводить практически полную гибку представлена на рис. 51. Для подгибки другой стороны.

Находят своё применение также горизонтальном направлении и с Недостатки трёхвалковых машин одной из них представлена на рис. 52.

Средние валки имеют устанавливать по высоте в перемещаясь, определяют радиус При этом можно избежать подгибки

Валцы выбираются по длины и толщины изгибаемого необходимой для выполнения операции гибки. В частности,

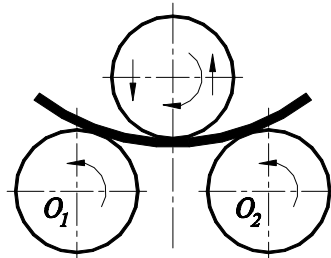


$$R = \text{var}$$

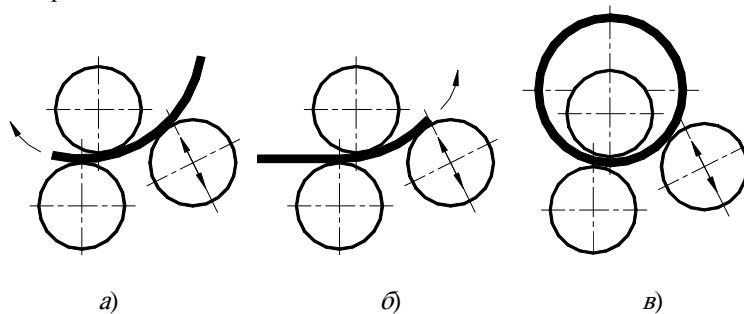
**Рис. 48. Гибка на двухвалковых машинах:**  
1 – гибочный упор; 2 – стол;  
3 – давящий валок;  
4 – опорный валок



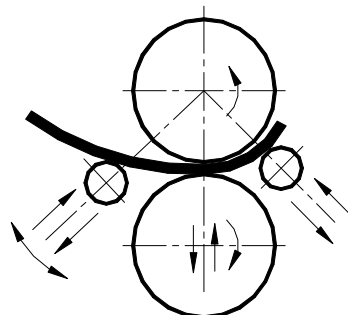
**Рис. 49. Валцы с эластичным покрытием**



**Рис. 50. Трёхвалковая симметричная машина**



**Рис. 51. Схема гибки листа на машине с асимметричным расположением валков**



**Рис. 52. Четырёхвалковая листогибочная машина**

четырёхвалковые машины используются для гибки листов с толщиной до 80 мм и шириной до 5 м.

радиуса.

верхний валок меньшего диаметра полностью диаметра имеет эластичное покрытие. В качестве но чаще полиуретан, так как в отличие от резины поэтому не уменьшается в объёме. Полиуретан износоустойчивостью и упругостью.

изготавливаются путём замены верхнего валка. простота конструкции, отсутствие порчи кромок без специальных приспособлений, гибка регулирования валков, высокая точность изделий.

видом валцов является трёхвалковая Рабочее движение сообщается нижним валкам с валок выполняется подвижным, это необходимо гибки, который регулируется вертикальным снятия заготовки, когда верхний валок выводится

достигается в несколько проходов при Кривизна изгиба, достигаемая за один проход, приводных валков с заготовкой.

трёхвалковых машин заключается в том, что примерно половине межцентрового расстояния плоским, так как наибольший изгибающий момент т.е. середину  $O_1 O_2$ . Подгибка концов при этом операция.

расположением валков (рис. 51) позволяют обечайки. Одна из схем таких машин второго края листа заготовку вставляют в валцы с

машины с регулировкой боковых валков в перемещающимся верхним валком.

устранены в четырёхвалковой машине. Схема

принудительное вращение. Нижний валок можно зависимости от толщины листа. Боковые валки, гибки и выполняют подгибку концов заготовок. концов как самостоятельной операции.

технической характеристике в зависимости от проката, в соответствии с мощностью,



Минимальный радиус гибки на вальцах определяется диаметром среднего валка. При необходимости гибки заготовок цилиндрических элементов на малые радиусы применяются машины с поворотной траверсой (рис. 53). Малые радиусы имеют также место в плоскостенных элементах и трубах малого диаметра.

Листовая заготовка 3 с помощью нажимной траверсы 1 прижимается по линии изгиба между опорным столом 4 и оправкой 2.

Гибка выполняется за один ход поворотной траверсы 5. Оправки (шины) являются сменными и выбираются в зависимости от формы изгиба.

Гибка на прессах применяется при формоизменении толстолистовых заготовок толщиной свыше 90 мм. Представляет собой разновидность штамповки. Плоская заготовка принимает соответствующую форму, например, полуцилиндра 2 в глухой матрице 3 под действием пуансона 1 (рис. 54).

Для получения полуобечеек толстостенной сварной аппаратуры используются вертикальные гидравлические прессы с усилием до  $10^4$  кН.

Точность заготовки после проведения гибочной операции во многом определяет качество готового изделия (обечайки). Поэтому необходимо рассмотреть возможные дефекты формы при гибке с указанием причин их возникновения.

Перекося кромок (рис. 55, а) происходит вследствие того, что в начале гибки край листа перекошен относительно осей валков. Дефект исправляется обратным перекосом листа.

Конусность (рис. 55, б) возникает из-за непараллельности осей верхнего и нижнего валков. Для исправления дефекта необходимо опустить верхний валок со стороны большего радиуса.

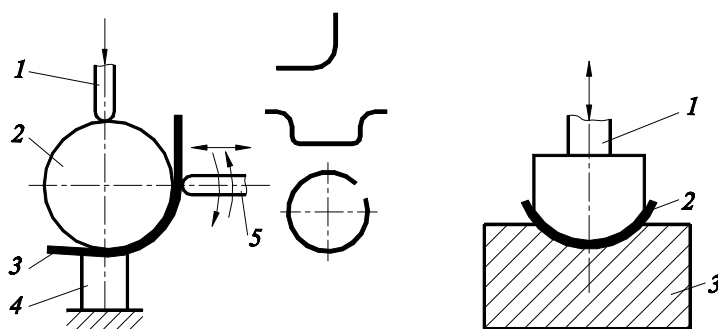


Рис. 53. Гибочная машина с поворотной траверсой

Рис. 54. Гибка полуобечеек на прессах

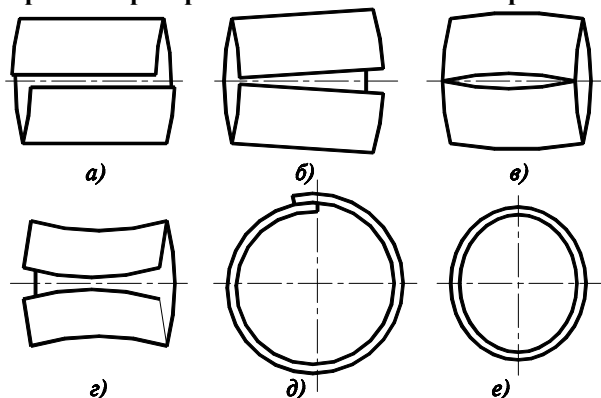


Рис. 55. Дефекты, возникающие при гибке на вальцах

Бочкообразность (рис. 55, в, г) – с выпуклой (в) и вогнутой (г) образующими является следствием чрезмерного прогиба валков по длине. Выпуклая бочкообразность получается при меньшем изгибе листа посередине, а вогнутая (седловидность) – при меньшем изгибе на концах.

Чрезмерная кривизна (рис. 55, д) возникает как следствие излишнего усилия гибочного валка из-за неправильно назначенного радиуса гибки, а овальность (рис. 55, е) из-за непостоянства усилия зажима листа между валками (по всей длине), часто из-за его проскальзывания.

Требуемый радиус кривизны контролируется шаблонами.

### 2.2.7. ГИБКА КОНИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК

В аппаратостроении гибка конических заготовок наиболее часто производится на листогибочных вальцах. Особенностью гибки является требование создания неодинакового по ширине прогиба заготовки: у кромки с меньшим радиусом – большего, у кромки с большим радиусом – меньшего. Кроме того, вершины сгибаемого конуса всегда должны лежать в вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось среднего валка. Это условие может быть выполнено, если скорости перемещения кромки заготовки в валках пропорциональны расстоянию их до вершины конуса.

Это достигается путём установки под углом среднего валка у симметричных вальцев (рис. 56) и бокового (нажимного) у асимметричных трёхвалковых и четырёхвалковых вальцев.

В процессе гибки различные участки конической заготовки должны перемещаться в валках с различной скоростью, так как длины окружностей малого и большого оснований различны. Поэтому организуют принудительное проскальзывание

валков по заготовке, например, упорными роликами, воспринимающими усилие кромки обечайки и ориентирующие заготовку в процессе гибки.

При гибке крупногабаритных обечайек из листов значительной толщины (более 20 ... 30 мм) применяется способ, при котором валкам машины вращение не сообщается.

Заготовку мелом разбивают на ряд участков (1 ...  $n$ ), в каждом из которых показывают среднюю линию (рис. 57). Процесс гибки начинают с подгибки кромок заготовки (в радиальном направлении) последовательно с одного, затем с другого края по средней линии. Затем гнут середину заготовки на данном участке. После переустановки осуществляют прогиб на следующем участке. Валковая машина в этом случае работает как пресс. После предварительной гибки производят доводку для получения кривизны требуемого радиуса, на «мягких» режимах деформации заготовки.

Рассмотренный способ малопроизводителен и вызывает повышенный износ оборудования. Поэтому при крупносерийном производстве используют трёхвалковые машины со сменными коническими валками.

В последнее время всё большее применение получает безвальцевое изготовление конических обечайек толщиной до 20 мм – метод свёртывания.

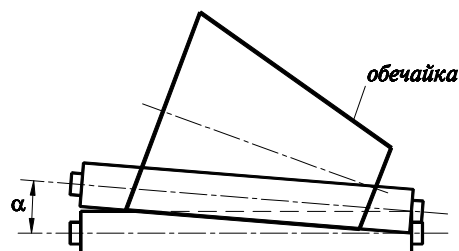


Рис. 56. Схема гибки конической обечайки на трёхвалковой машине

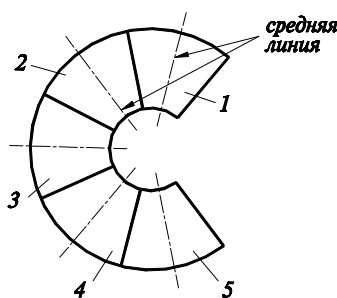


Рис. 57. Способ разметки заготовки

Существует несколько вариантов схем работы гибочных машин, осуществляющих этот метод. Одна из них показана на рис. 58. Кромки 3, 4 заготовки 1 закрепляют в опорах 5 и 2. Затем кромки сводят навстречу друг другу вокруг оси симметрии заготовки. Одновременно с перемещением кромок, зажатых в опорах, поворачивают опоры: правую 2 по часовой стрелке, левую 5 против часовой стрелки. При перемещении кромок 4 и 3 навстречу друг другу и повороте их вместе с опорами происходит гибка. Сведённые кромки соединяют прихватками, освобождают от зажимов и снимают готовую обечайку. Процесс можно осуществлять и при движении только одной кромки с опорой навстречу другой.

Так на рис. 59 показана схема гибки конической заготовки на базе фланцегибочной машины. В этом случае заготовка крепится на неподвижной струбине 1 и во вращающейся планшайбе 2. Перед гибкой заготовку несколько приподнимают над поверхностью планшайбы для получения начального радиуса кривизны.

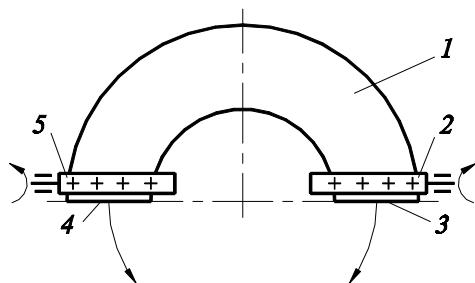


Рис. 58. Схема способа свёртывания заготовки

В условиях серийного производства целесообразно использовать формообразование конических обечайек в инструментальных штампах.

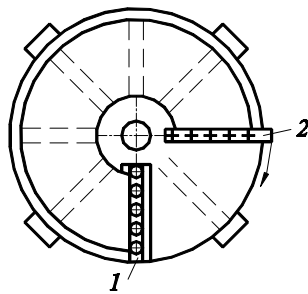


Рис. 59. Способ гибки конических обечаяк

На рисунке 60 показана конструкция штампа для изготовления обечаяк с углом при вершине  $2\alpha > 60^\circ$ . Он состоит из сменной матрицы 1 с пазами 2 на боковой поверхности и универсального пуансона 6, по оси которого установлена регулируемая пята 4. В направляющих пазах 5 пуансона размещены каретки 3. Блоки шариков 8 уменьшают трение при перемещении кареток. На осях 7, закреплённых на каретках, свободно установлены ролики 9, воздействующие на заготовку.

При изготовлении обечайки плоская заготовка прогибается в центральной части пятой 4, затем проталкивается в матрицу с помощью роликов, воздействующих на периферийную кромку заготовки. По мере свёртывания заготовки каретки перемещаются к центру пуансона, обеспечивая постоянный контакт роликов с заготовкой. При этом направляющие пуансона проходят в пазах матрицы, а каретка при опускании пуансона взаимодействует с внутренней поверхностью матрицы и благодаря этому перемещаются к центру.

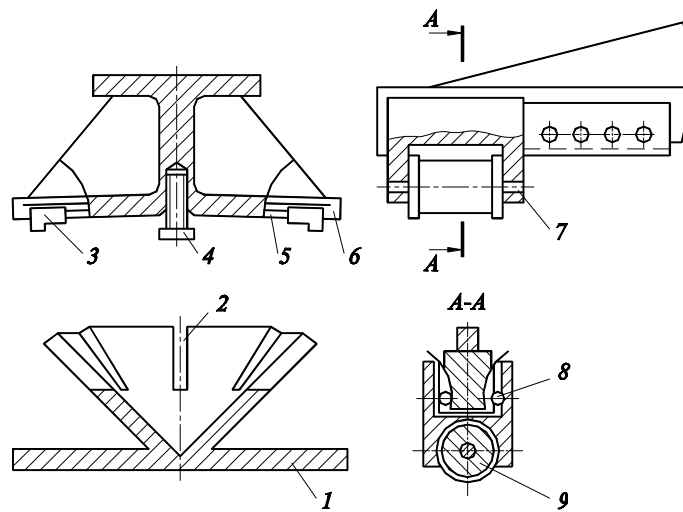


Рис. 60. Штамп для изготовления конических обечаяк

### 2.2.8. ГИБКА ТРУБ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

Гибка труб относится к обработке металлов давлением. Учитывая весьма сложный характер деформации материала трубы в процессе гибки, большинство расчётных зависимостей для определения режимов гибки, получено эмпирическим путём.

Главная технологическая задача, решаемая в процессе изготовления криволинейного (изогнутого) профиля трубной заготовки, заключается в обеспечении заданного радиусагиба –  $R$  (рис. 61) при минимально допустимом отклонении от формы поперечного сечения исходной заготовки – обычно цилиндрической. При гибке тонкостенных труб не допускается образование поперечных складок – гофр.

Учитывая, что наибольшие деформации претерпевает нижняя стенка труб с нейтральным радиусомгибки  $R_b$ , поэтому последний входит в расчётную формулу  $R = R_b + 0,5D$ .

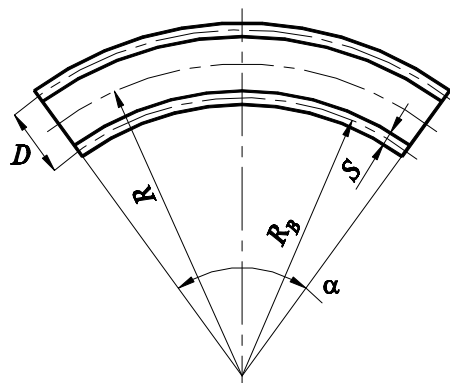


Рис. 61. Схема гнутья труб

Из условия недопущения критической деформации экспериментально установлено, что  $R_b = 20S$ . Введём понятие критерия тонкостенности труб  $K_T$ :

$$K_T = \frac{S}{D}; \quad R = 20K_T D + 0,5D.$$

Если  $R > D(20K_T + 0,5)$ , то проводится холодная гибка, а если меньше – горячая.

На практике гнутьё труб выполняют в холодном состоянии до значений  $R \approx D$ , чему соответствует  $K_T = 0,025$ .

От значения критерия  $K_T$  зависит также и технология гнутья трубы. С уменьшением значения  $K_T$  технологический процесс усложняется.

При гнутье тонкостенных труб образуются поперечные складки – гофры, и происходит искажение профиля. Гофры возникают под действием тангенциальных сил (наружные волокна растягиваются, а внутренние сжимаются), искажение профиля происходит от действия радиальных сил.

Профиль искажения интенсивнее с уменьшением относительного радиуса гнутья трубы  $r = R/D$ .

При малых значениях  $r$  гнутьё труб осуществляется с внутренней оправкой. Для значения  $K_T$  в пределах  $0,03 < K_T < 0,2$  минимальное значение относительного радиуса гнутья трубы без применения оправки ( $r^1$ ) определяется по эмпирической формуле

$$r^1 = 9,25\sqrt{0,2 - K_T}.$$

Если  $r > r^1$ , оправка не нужна,  $r < r^1$ , оправка необходима. Уменьшение диаметра допускается не более чем на 10%.

Для определения режимов гибки на трубогибочных станках необходимо учитывать упругую разгрузку трубы (пружинение), имеющую место после снятия нагрузки. Величина этого фактора зависит от:

- механических свойств материала (чем выше модуль упругости, тем больше упругая деформация);
- геометрических параметров трубы игиба – диаметр трубы, толщина стенки, радиусгиба, длина изогнутой части трубы;
- условия нагружения трубы, т.е. способа гибки;
- степени образования овальной формы трубы вгибе, т.е. условия поддержания стенки трубы;
- неоднородности напряжённого состояния в поперечном сечениигиба.

Упругую деформацию определяют экспериментальным путём. Радиусгиба  $R_{cp}$  после снятия нагрузки рассчитывают по формуле, мм

$$R_{cp} = 0,5K_y D_{ш},$$

где  $D_{ш}$  – диаметргибочного шаблона;  $K_y$  – средний коэффициент упругой деформации, учитывающий диаметр и марку материала труб.

Для стальных, медных, медно-никелевых труб диаметром до 40 мм среднее значение  $K_y = 1,02$ ; для медных и медно-никелевых труб диаметром более 40 мм  $K_y = 1,014$ ; для стальных труб диаметром более 40 мм  $K_y = 1,02$ .

Уголгиба, учитывая упругую деформацию, определяют по формуле, град

$$\alpha_1 = \alpha \left( 1 + \frac{1}{m} \right),$$

где  $\alpha$  – уголгиба трубы;  $m$  – коэффициент, определяющий упругую деформацию трубы (для медных и медно-никелевых труб  $m = 75$ , для стальных труб при отношении  $R/D = 2 \dots 3,3$ ;  $m = 60 \dots 40$ ).

В аппаратостроении используют гибку труб в холодном и горячем состоянии.

По способу все механизмы для холодной гибки разделяют на:

- механизмы с обкаткой, применяемые для изгиба труб диаметром до 70 мм, когда допускаются некоторые отклонения от круглой формы в сечении изогнутого участка. В этом случае вокруг неподвижного гибочного шаблона 1 движется обкатывающий ролик 2, прижимающий трубу непосредственно к шаблону (рис. 62, а) или с помощью ползуна 3 (рис. 62, б);
- механизмы с наматыванием, используемые для гнутья труб диаметром 10 ... 20 мм, в которых шаблон 1 вращается, а ползун 2, остаётся неподвижным (рис. 63, а) или имеет возможность перемещаться в продольном направлении (рис. 63, б);
- механизмы на двух опорах, позволяющие проводить гибку труб диаметром до 320 мм. Заготовка укладывается на две опоры 1, способные поворачиваться вокруг своих осей, а усилие прилагается в середине трубы. Гибочный сегмент 2 соединяется со штоком гидро- или пневмоцилиндра 3 (рис. 64);

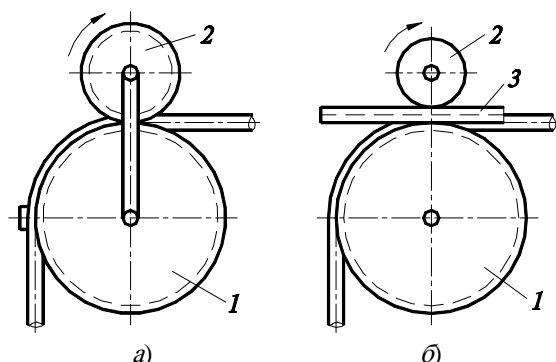


Рис. 62. Схема механизма с обкаткой

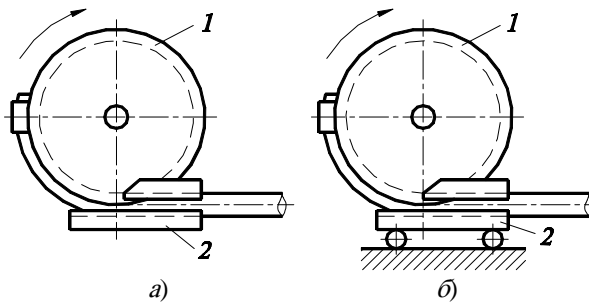


Рис. 63. Схема механизма с наматыванием

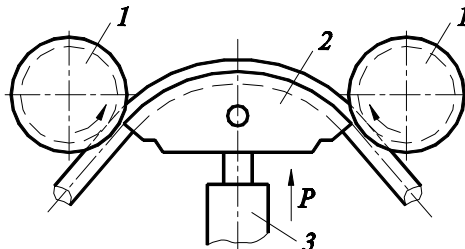


Рис. 64. Гибка труб на двух опорах

– механизмы с волочением, применяемые при гибке тонкостенных цельнотянутых труб. Один конец заготовки обжимается до заданного диаметра. Обжатый конец 1 продавливается через фильеру 2 и захватывается зажимом 3, укрепленным на станине. При вращении гибочного шаблона 4, труба протягивается через фильеру и одновременно гнётся вокруг гибочного шаблона. Использование данного способа позволяет гнуть заготовки малой длины на малый уголгиба (рис. 65).

Гибка с нагревом заготовок позволяет уменьшить усилие гибки и облегчает формообразование:

– протяжка на роге, заключающаяся в том, что заготовка трубы 2, 3 одевается на штангу с рогообразным сердечником 4 (рис. 66), который имеет заданную кривизну  $R$ . Заготовка нагревается и проталкивается плунжером 1 по сердечнику, при этом происходит изгиб трубы и одновременно калибровка готовой детали (двойник) 5. Наименьший диаметр оправки (рога) равен внутреннему диаметру заготовки  $d_{\text{н}}$ , а наибольший – внутреннему диаметру двойника  $D_{\text{н}}$ ;

– гибка на штампе является одним из высокопроизводительных способов, реализующих гнутьё в одной или нескольких плоскостях. Однако этот способ экономически обоснован только при серийном выпуске изделий.

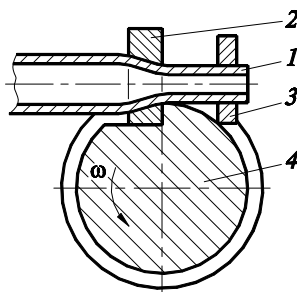


Рис. 65. Схема механизма с волочением

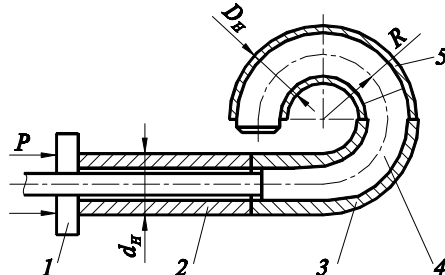
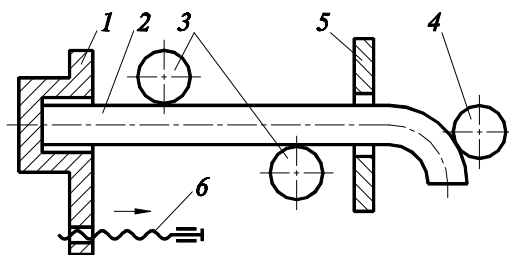


Рис. 66. Схема протяжки на роге

Индукционный метод гибки предполагает нагрев труб токами высокой частоты (ТВЧ) и позволяет выполнять гибку на малый радиус (рис. 67). В этом случае труба 2 устанавливается в кольцевом индукторе 5 и на направляющих роликах 3. К концу трубы прикладывается усилие с помощью нажимного ролика 4. Продольное перемещение трубы осуществляется кареткой 6 при помощи торцевого упора 1. Кольцевой участок, помещённый в индукторе, нагревается до  $1000^{\circ}\text{C}$ , а на выходе из индуктора охлаждается. Таким образом, горячий участок трубы, в котором происходит деформация гибки, поддерживается с обеих сторон жёсткими холодными участками, что препятствует искажению формы сечения трубы.

Для большинства методов характерно, что в процессе гибки изменяется форма сечения трубы, поэтому необходимо применение устройств, поддерживающих стенки трубы снаружи и изнутри. Поддержка стенки снаружи осуществляется с помощью ручья гибочного сегмента и ползуна. Для поддержания стенок изнутри используются различные наполнители: песок, вода, лёд, легкоплавкие металлы, смолы, резина. Например, применяется наполнитель из 50% висмута, 26,7% свинца, 13,3% олова, 10% кадмия. Однако применение наполнителей – процесс трудоёмкий и полностью не обеспечивающий качество гибки. Поэтому разработаны различные конструкции оснасток для гибки труб (дорны, оправки).



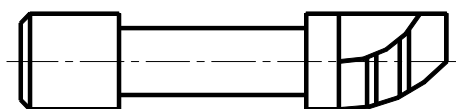
**Рис. 67. Схема индукционного метода гибки**

Условно их можно классифицировать: по форме – сплошные, раздвижные, составные; по жёсткости – жёсткие, нежёсткие, эластичные; по поверхности контакта – точечные, линейные; по форме опорной поверхности – цилиндрические, сферические, торовые.

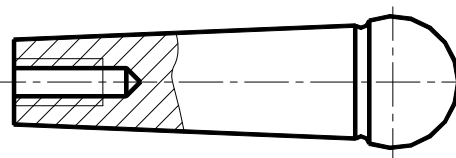
Самым простым дорном, используемым при гибке труб диаметром до 40 мм, служит стальной канат.

Распространение получили дорны в виде стержня с ложкообразной формой конца (рис. 68). Дорн соединяется с тягой, длина которой соизмерима с длиной заготовки и помещена внутри трубы, которая в процессе гибки протягивается по нему. Зазор между дорном и трубой оказывает большое влияние на точность размеров поперечного сечения трубы и должен исключать возможность образования гофр. Детали, у которых сопряжение гибов осуществляется без прямолинейных участков, изготавливают с применением дорнов со сферическими головками (рис. 69).

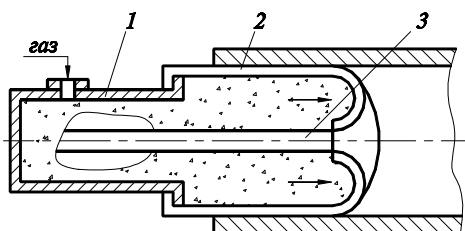
Используют также оправку, содержащую корпус 1 и эластичную оболочку 2 с наполнителем, связанную цилиндрической частью с корпусом, а средней частью с приводом 3. Это позволяет исключить многие технологические операции, связанные с набивкой труб наполнителем (рис. 70).



**Рис. 68. Дорн ложкообразный**



**Рис. 69. Дорн со сферической головкой**



**Рис. 70. Оправка с наполнителем в эластичной оболочке**

Для обеспечения возможности гибки труб различного диаметра используют оправку, в которой звенья выполнены в виде двух рычагов 1 с шаровыми сегментами головками 2, установленными с возможностью поворота в плоскостигиба, снабжённых цапфами, а также соединённых между собой планками 3, связанными с регулирующим механизмом (рис. 71).

В отличие от предыдущей конструкции, оправка, изображённая на рис. 72 выполнена со сменной сферической частью 1.

К многозвенным механическим оправкам относится конструкция, изображённая на рис. 73. Каждое звено содержит тяги 1, закреплённые на осях в цапфах 2, а другим концом – попарно в пазах шаровой сегментной головки 3. Звенья оправки монтируются на гибком тросе 4, который одним концом крепится к цапфе крайнего звена, а другим концом посредством винта 5 – к винтовому механизму 6 с гайкой 7. Пружины сжатия 8, установленные внутри цапф 2, позволяют обеспечить извлечение оправки из трубы, так как после окончания гибки гайку 7 ослабляют, цапфы расходятся, а сегментные головки выходят из контакта с внутренней поверхностью трубы.

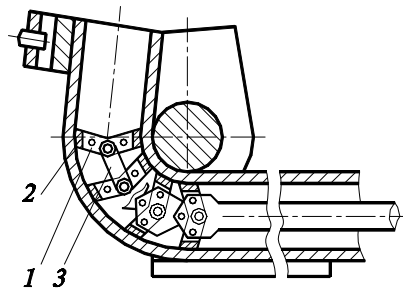


Рис. 71. Оправка с шаровыми головками

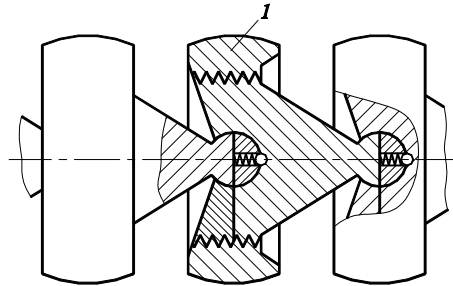


Рис. 72. Оправка со сменными шаровыми сегментами

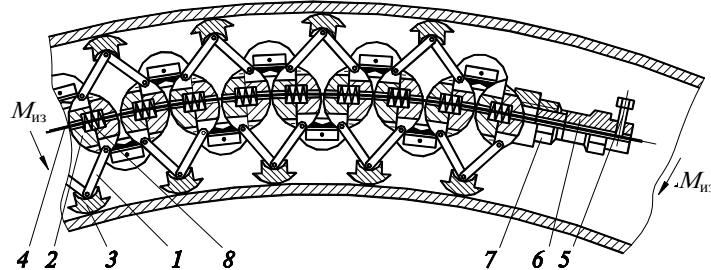


Рис. 73. Схема оправки с шаровой сегментной головкой и механизмом регулирования

Конструкции механических многозвенных оправок предусматривают равномерное распределение пятен контакта внутренних устройств с поверхностью трубы.

Наиболее опасной, с точки зрения потери устойчивости и складкообразования, является поверхность трубной заготовки со стороны меньшего радиуса. Показанная на рис. 74 оправка позволяет сконцентрировать опорную поверхность звеньев именно в опасном сечении трубы, а асимметричное расположение троса – предельно уменьшить радиус гибки.

Значительную сложность в производственных условиях представляет изготовление крутоизогнутых патрубков, торовых и сферических ёмкостей. Традиционным способом изготовления таких деталей аппаратов является многопереходная штамповка на инструментальных

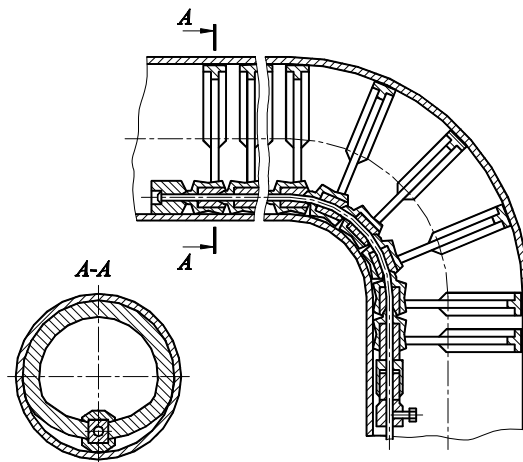


Рис. 74. Оправка для гибки труб с малым радиусом

штампах. Его недостатком является большой объём доводочных работ и ограниченные габариты изделий. Патрубки также можно получить гибкой тонкостенных труб в горячем состоянии с наполнителем, но при этом не исключается возможность гофрообразования и искажения номинального профиля заготовки.

Поэтому представляется перспективной технология гибки-про-катки листовой заготовки (полосы) на двухроликовой машине.

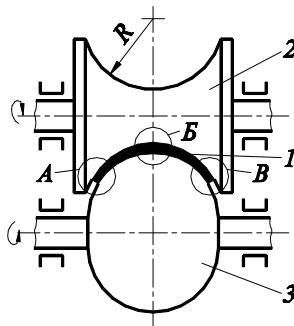
Листовую заготовку 1 (рис. 75) прокатывают между двумя профилированными роликами (1, 2) и изгибают в одном или в двух направлениях.

В поперечном направлении заготовка изгибается в результате профилирования роликами, а в продольном (направление прокатки) – за счёт того, что зазор между роликами в определённых зонах поперечного сечения меньше исходной толщины заготовки.

Материал заготовки в этих зонах утоняется, а, следовательно, изменяется продольная кривизна. Знак кривизны зависит от того, в каких местах поперечного сечения заготовки расположены зоны утонения: если зона утонения находится вблизи оси симметрии (зона В), кривизна – положительная; если же зона расположена вблизи обеих боковых кромок (зоны А и В), кривизна – отрицательная. В том случае, когда зона утонения расположена вблизи одной из продольных кромок, происходит изгиб в плоскости заготовки.

Оптимизация данного процесса гибки-прокатки ведётся по пути подбора рациональной схемы его проведения и создание необходимых условий трения заготовки с роликами. При этом учитывается, что величина максимального утонения материала заготовки не превышает 20%.

Наилучшие результаты получаются при использовании выпуклого ролика в качестве холостого, а вогнутого – приводного. Заготовку перед деформированием смазывают со стороны холостого ролика.



**Рис. 75. Схема гибки-прокатки**

Для уменьшения усилия гибки, а значит и требуемой мощности оборудования, применяют многопроходную обработку, которая также положительно сказывается на качестве изделия.

Рассмотренный способ позволяет получать изделия сравнительно большого диаметра (до 800 ... 1000 мм) и практически неограниченной длины.

### **2.2.9. СБОРКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ АППАРАТОВ**

Сборка свариваемых элементов в аппаратостроении предшествует операции сварки и проводится для фиксации положения свариваемых элементов в пространстве. Последующая операция сварки окончательно закрепляет положение деталей, установленное при сборке. В процессе сварки под действием сварочных напряжений возможно изменение пространственного положения свариваемых элементов. Поэтому при осуществлении операции сборки под сварку необходимо учесть сварочные напряжения и деформации. Обязательным условием является также необходимость обеспечения требуемого сварочного зазора.

Из возможных видов сборки свариваемых элементов наиболее распространённым является стационарная сборка.

В операцию сборки входят следующие технологические переходы:

- 1) установка свариваемых элементов в сборочных приспособлениях;
- 2) проверка сопряжений кромок и базовых поверхностей;
- 3) подгонка элементов;
- 4) фиксация кромок неразъёмными и разъёмными способами;
- 5) сварка и последующая обработка шва.

На сборку поступают детали после прохождения заготовительных операций. Поэтому именно здесь проявляется качество выполнения предшествующих операций, согласованность функциональных и технологических допусков.

Основная технологическая задача сборки под сварку стыкуемых элементов заключается в обеспечении допусков на: смещение кромок; величину сварочного зазора; угловых размеров. Тщательность пригонки соединяемых частей является одним из главных условий обеспечения равнопрочности сварных швов.

В практике аппаратостроения для достижения правильности сопряжений обязательно применяют приспособления. Последние существенно влияют на степень механизации производственных процессов, производительность труда и качество сварных конструкций. Приспособления необходимы независимо от серийности производства.

В большинстве случаев применяют переносные приспособления ручного действия. Задача совмещения кромок и фиксации зазоров между ними решается при использовании специальных струбцин (рис. 76). Кромки листа, закрепляемые прижимными винтами 1, друг относительно друга, выравниваются винтом 2, а просвет между кромками регулируется и фиксируется винтом 3.

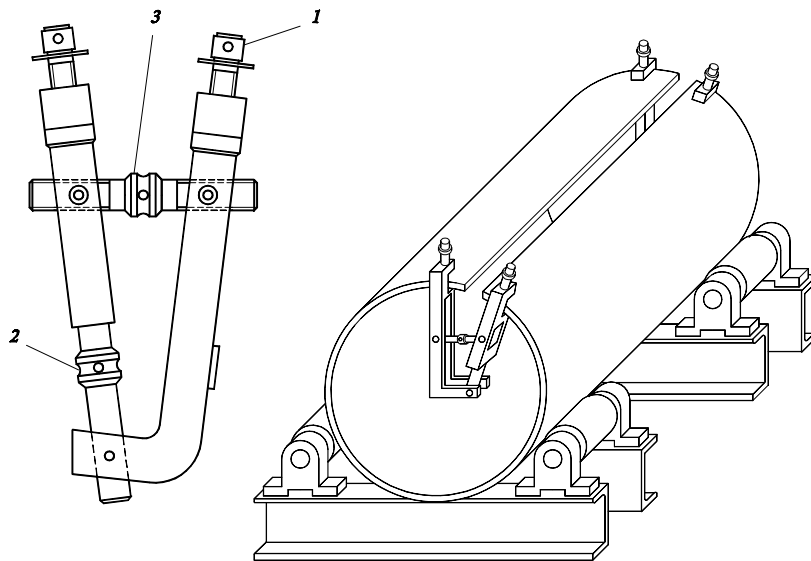
Для сопряжения кромок одной обечайки требуется две струбцины, которые устанавливаются с противоположных торцевых сторон обечайки.

Сохранение цилиндрической формы обечайки при сборке обеспечивается применением специальных устройств, которые стягивают либо наоборот распирают заготовку. Данные приспособления включают несколько (обычно 6) домкратов, конструктивно зафиксированных на едином кольцевом корпусе. На рисунке 77 показаны конструкции сборочных колец, которые используются вместо струбцин при сборке тонколистовых и нежёстких серийно выпускающихся обечайек.



При сборке аппаратов значительных размеров применяют систему стяжных планок и прокладок, построенную по принципу клиновых соединений (рис. 78).

Шайбы 1 и прокладки 3 предварительно прихватываются к свариваемым элементам и устанавливаются с шагом 600 мм. По окончании сварки их удаляют обрубкой или кислородной резкой.



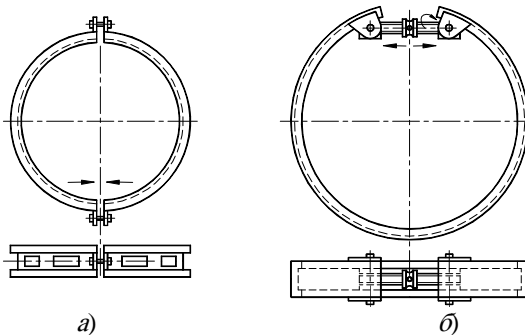
**Рис. 76. Струбцина**

Одновременно со сборкой стыкового соединения устанавливают технологические планки для начала и окончания сварки шва.

На рисунке 79 показано расположение прихваток и технологических планок.

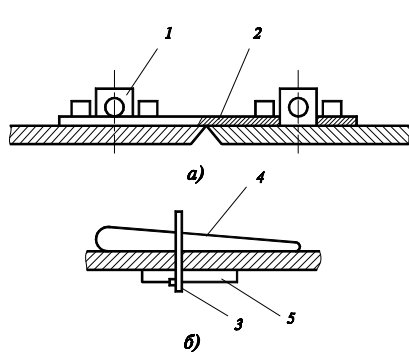
Правильным расстоянием между прихватками считают длину шва, которую можно наложить одним электродом, или кратную ей длину (табл. 3).

Заходная технологическая планка служит для установления стабильного режима сварки, выводная – для завершения сварки шва, а контрольная – для последующей лабораторной проверки качества сварного соединения.



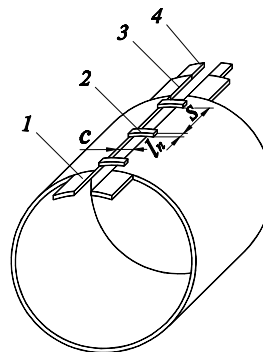
**Рис. 77. Сборочные кольца:**

*а* – стяжное; *б* – распорное



**Рис. 78. Стяжные приспособления для сборки:**

*а* – конструктивная схема стяжных планок; *б* – клиновые прокладки:  
1 – шайбы; 2 – планка; 3 –



**Рис. 79. Схема расположения прихваток и планок:**

1 – планка заходная;  
2 – прихватка; 3 – пластина контрольная; 4 – планка

Толщина материала, мм	Шаг прихваток $S$ , мм	Длина прихваток $l_p$ , мм
1,5 ... 3,0	45 ... 100	10 ... 25
> 3,0	150 ... 500	20 ... 80

В аппаратостроении обязательными являются сборочно-сварочные механизмы, основное назначение которых заключается в непрерывном или периодическом изменении позиций деталей относительно сварочной головки, т.е. выполнять роль кантователей. Сюда относятся:

- а) роликовые стенды – кантователи, у которых установочной базой является цилиндрическая поверхность;
- б) кольцевые кантователи, у которых установочной базой является сложная криволинейная поверхность: основой приспособления служит роликовый стенд;
- в) торцевые кантователи с двумя планшайбами, у которых установочная база – две торцевые поверхности и ось вращения (в большинстве случаев – горизонтальная);
- г) кантователи с вращающимся наклонным столом, у которых установочной базой является одна торцевая поверхность (их часто называют манипуляторами или позиционерами);
- д) стеллажи, у которых установочной базой является плоская поверхность деталей – листов и секций из них.

Сборка отдельных элементов аппаратов завершается их сваркой. В аппаратостроении используется в основном ручная электродуговая сварка и сварка автоматическая под слоем флюса. Основные требования к сварке аппаратов подробно изложены в правилах Госгортехнадзора и справочной литературе по технологии конструкционных материалов. Наряду со сваркой используют также пайку и клепаные соединения.

К новым технологиям неразъёмного соединения тонколистовых материалов следует отнести холодное точечное соединение (ХТС).

Принцип получения ХТС заключается в том, что листы металла, уложенные внахлест, с помощью специального инструмента локально продавливаются, и за один проход образуется «выдавка» с пластической деформацией элементов и затеканием материала одного листа в полость другого.

С позиций холодной штамповки процесс создания ХТС представляет собой сочетание двух видов деформаций – резки по незамкнутому контуру одного или двух слоёв металла (может отсутствовать) и двухслойной вытяжки. Указанные методы деформирования определяют возможную толщину соединяемых листов и требования, предъявляемые к механическим свойствам металлов.

Наиболее часто используют листы, соединяемые продавливанием, толщиной ~ 1,5 ... 2 мм; при больших толщинах значительно возрастают усилия, необходимые для образования ХТС.

Достаточно пригодными для ХТС можно считать металлы с соотношением  $\sigma_T/\sigma_B \leq 0,65$  при относительном удлинении  $\delta \geq 28\%$  и глубине вдавливания не менее 11,5 мм (при толщине листа  $s = 1$  мм).

Оборудование для ХТС представляет собой основание с закреплённым на нём штампом и приводное устройство для перемещения формообразующих органов. Штамп (рис. 80) состоит из вытяжного пуансона 1 и матрицы 2. Соединяемые металлические листы располагают над матрицей, затем вытяжной пуансон осуществляет в матрице вытяжку двух слоёв металла на такую глубину, что в образовавшейся «выдавке» верхний слой металла опускается за опорную поверхность нижнего слоя.

При этом возможно прорезание одного или обоих листов по незамкнутому контуру. Далее выполняется пластическое деформирование доньшка «выдавки» между вытяжным пуансоном и матрицей, что обеспечивает затекание металла верхнего слоя за границы отверстия, образованного в нижнем слое при продавливании. Затем производится разъем штампа.

На рисунке 81 показано несколько вариантов «выдавок» ХТС, соответствующих различным соотношениям размеров инструмента и толщины листов.

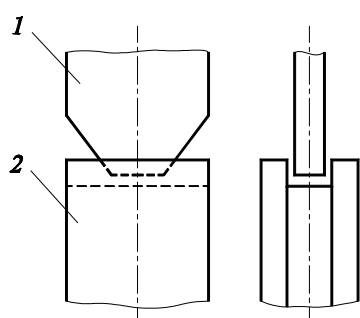


Рис. 80. Штамп для ХТС

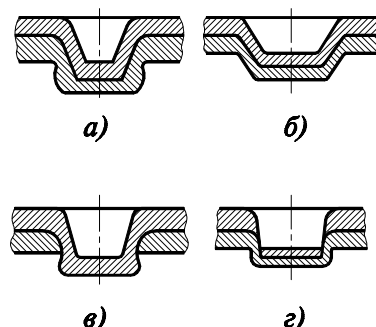


Рис. 81. Варианты схем «выдавок»

## 2.3. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ АППАРАТОВ

### 2.3.1. ВИДЫ ОБЕЧАЕК

Обечайки являются базовой деталью всех колонных, теплообменных и других аппаратов. Они бывают:

а) жёсткие, которые не изменяют формы поперечного сечения под действием собственного веса. Для них справедливо соотношение

$D_{\text{вн}} / S \leq 150$ , где  $S$  – толщина стенки обечайки;  $D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр обечайки;

б) нежёсткие  $D_{\text{вн}} / S > 150$ ;

в) толстостенные (корпуса), если  $D_{\text{н}} / D_{\text{вн}} > 1,1$  (конструктивный признак) или толщина стенки  $S \geq 40$  мм (технологический признак),  $D_{\text{н}}$  – наружный диаметр обечайки.

Основные геометрические размеры обечайки:  $D_{\text{вн}}$ ,  $S$ ,  $H$  – высота обечайки. Базовый размер  $D_{\text{вн}}$  – стандартизован.

По форме обечайки делятся на гладкие и со специальными рёбрами, отбортовками, зигами.

Заготовками для обечаек являются: листовой прокат, литье, поковки, трубы.

Обечайки диаметром до 600 мм изготавливаются с одним продольным швом, а свыше 600 мм можно из нескольких листов. При этом ширина замыкающей вставки должна быть не менее 400 мм. Допускается прогиб обечайки при длине до 5000 мм – не более 2 мм, свыше 5000 до 10 000 мм не более 15 мм. Допускаемый перекося продольного шва относительно оси – не более 8 мм на 1 погонный метр длины. Неперпендикулярность торца обечайки к её образующей допускается до 1 мм на 1 м диаметра, но не более 3 мм. Отклонение по высоте обечайки допускается в пределах  $\pm 5$  мм.

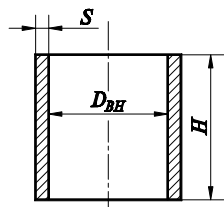
Основным расчётным размером заготовки является длина, которая определяется периметром обечайки по нейтральной линии минус размеры зазоров для сварочных швов, мм

$$L_{\text{заг}} = \pi(D_{\text{вн}} + S) - n\delta_{\text{св}}$$

где  $n$  – число продольных швов;  $\delta_{\text{св}}$  – зазор под сварку, мм.

Типовой технологический процесс изготовления обечайки включает следующие группы технологических операций:

- расконсервация и очистка;
- правка листового проката;
- разметка и раскрой листовых заготовок;
- резка листа на заготовки требуемого размера;
- обработка кромок под сварку;
- сборка заготовок;



**Рис. 82. Геометрические размеры обечаек**

- сварка карт;
- гибка (вальцовка) обечаек;
- сварка стыковых швов;
- калибровка и правка после сварки;
- контрольные операции.

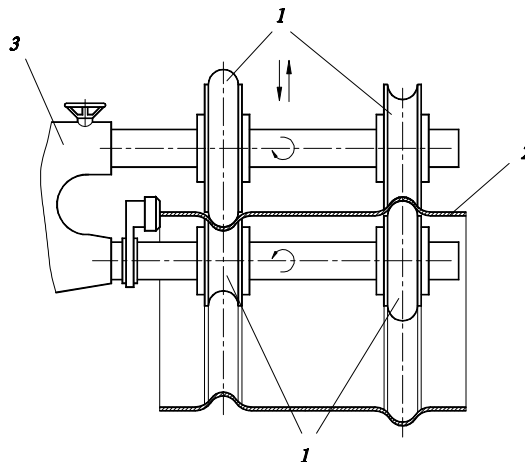
В зависимости от конструкции и требований к точности и шероховатости поверхности обечайки проводят комплекс завершающих операций. Рассмотрим некоторые из них.

### 2.3.2. ЗИГОВАНИЕ

Зигование применяют:

- для придания обечайке дополнительной жёсткости (наружные зиги);
- для установки и крепления разжимных опорных колец с целью последующей установки опор, тарелок, перегородок, решёток и т.д. (внутренние зиги).

Чем тоньше и мягче материал, тем выше скорость зигования. Для увеличения трения поверхности заготовки подвергают обязательной очистке и обезжириванию. Выполняется зигование на специальных зигочных машинах в условиях реверсивного перемещения заготовки.



**Рис. 83. Схема работы зигочной машины:**

1 – зиговочные ролики; 2 – обечайка; 3 – механический привод

Профиль зиговочных роликов должен соответствовать заданному зигу с учётом упругого пружинения материала. Внутренний вал приводной, а наружный имеет свободно вращающиеся ролики и может перемещаться по радиусу, вследствие чего регулируется глубина зигов.

Зигование обечайек из сталей и цветных металлов применяют для небольших (до 4 мм) толщин. Процесс осуществляется за 3–4 оборота обечайки.

В процессе зигования возникает утонение стенки обечайки, а также упрочнение (наклёп) в местах образования зигов. Для исключения наклёпа, появления трещин и волосовин применяют межоперационный отжиг.

### 2.3.3. РАЗБОРТОВКА ТОРЦОВ

Разбортовка торцов применяется для обеспечения поцарговой сборки. Выполняется на бортовочных машинах.

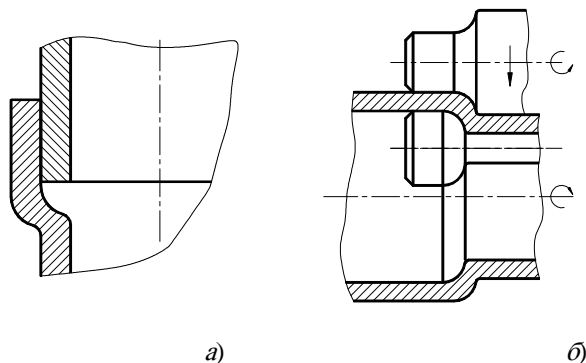


Рис. 84. Варианты разбортовки обечайек

На рисунке 84 показаны варианты разбортовки наружу (а) и внутрь обечайки (б).

### 2.3.4. ОТБОРТОВКА ТОРЦОВ

Отбортовка торцов производится также, как и разбортовка как вовнутрь, так и наружу (рис. 85).

Отбортовка наружу выполняется, как правило, для установки накладных фланцев, а вовнутрь – для обечайек под рубашки охлаждения корпусов теплообменников и для установки днищ. Операция выполняется на фланце-бортовочных машинах. На рисунке 86 показана схема работы такой машины, имеющей следующие основные элементы: 1 – опорный приводной ролик; 2 – нажимной ролик; 3 – бортовочный ролик; 4 – червячный вал.

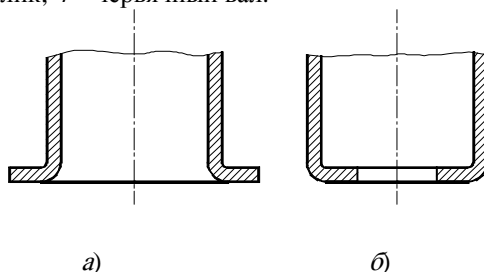


Рис. 85. Варианты отбортовки:  
а – наружу; б – вовнутрь обечайек

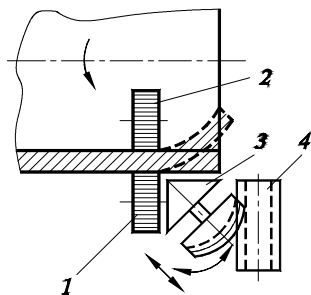


Рис. 86. Схема работы станка для отбортовки

Конструкция включает следующие основные узлы: станину 1, гидропривод 2 подъёма, раму подъёма 3, упорный ролик 4, пару поддерживающих роликов 5, установленных симметрично на раме подъёма, редуктор 7, привод 8 подъёма бортовочного ролика 11, привод 9 опорного ролика 10 (рис. 87).

Для отбортовки отверстий, выполненных в листовом материале, в том числе и в обечайках используют специальное устройство, показанное на рис. 88. Рабочим органом этого приспособления являются деформирующие элементы 1,

связанные с помощью кронштейнов 2, 3 с корпусом штока 4. Эти элементы выполняются с возможностью вращения вокруг собственной оси и оси вращения штока. По оси штока внутри корпуса имеется установочный винт 5, связанный резьбовым соединением с втулкой 6, установленной по шлицам на корпусе штока.

Наличие в конструкции упругого элемента, например, пружины 7, позволяет применять данное приспособление для отбортовки неточно изготовленных круглых отверстий, что имеет место при газовой резке листового проката, а также заведомо некруглых, например, эллиптических отверстий. Процесс отбортовки отверстия по стадиям показан на рис. 89.

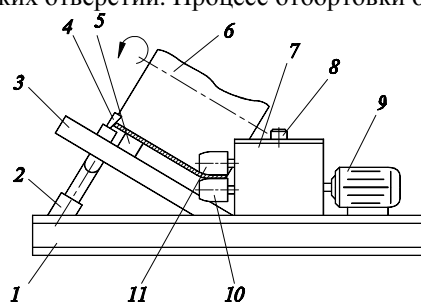


Рис. 87. Отбортовочная машина

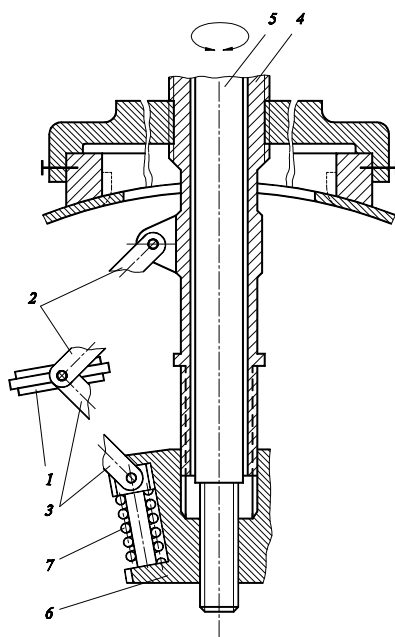


Рис. 88. Приспособление для отбортовки отверстий обечайки

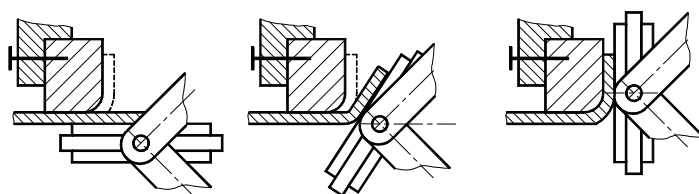


Рис. 89. Процесс отбортовки отверстия обечайки  
2.3.5. ШЛИФОВАНИЕ

Универсальным методом отделочной обработки является шлифование, которое осуществляется чаще всего ручными шлифовальными машинами с электрическим или пневматическим приводом. Инструментом являются абразивные круги и ленты. Однако данный метод часто не обеспечивает всё возрастающие требования к качеству поверхности, он трудоёмок и малопроизводителен.

Поэтому в настоящее время для обработки сложных крупногабаритных тел вращения применяют метод бескопирного (полусвободного) шлифования маятниковыми головками. Компоновка маятниковых шлифовальных головок в станках различна, но ей присущ один отличительный признак – наличие дополнительной степени свободы у абразивного инструмента за счёт возможности поворота рычага, несущего шлифовальную головку, на оси шарнирного подвеса  $A_0$  (рис. 90).

При бескопирном методе шлифования обеспечивается упругий прижим  $P_{пр}$  абразивного инструмента, что позволяет копировать погрешности формы изделия. Инструмент работает по «строкам», в результате на обработанной поверхности образуются спиральные строчки.

На рисунке 91 представлена схема станка для шлифования обечаек, реализующая рассматриваемый метод обработки.

Установка состоит из рамы 1, на которой смонтированы три пары резиновых роликоопор 3. Шлифовальная головка 10 закрепляется шарнирно на конце трубчатой штанги 5, установленной в суппорте 6, перемещающегося по направляющим

7. Привод суппорта осуществляется от электродвигателя через ходовой винт 8. Абразивный круг устанавливается на шпинделе 11 шлифовальной головки. Обечайка вращается от обрезиненных роликоопор, приводимых в движение электродвигателем с регулируемой частотой, а вращение инструмента осуществляется от электродвигателя 9 через вал, находящийся в трубчатой

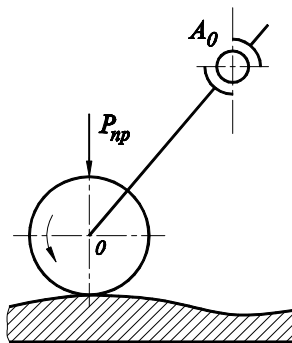


Рис. 90. Схема маятниковой шлифовальной головки

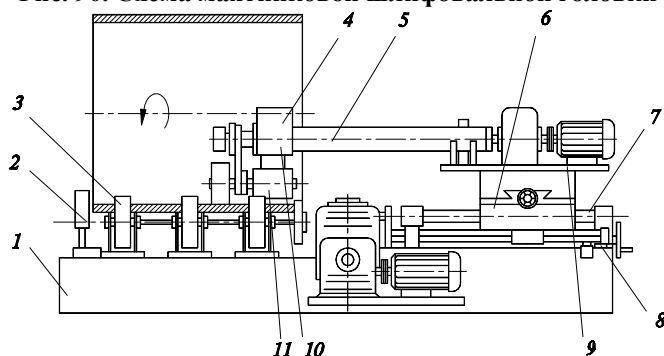


Рис. 91. Схема станка для шлифования обечайек

штанге. Для предотвращения съезжания обечайки с роликоопор предусмотрен упорный ролик 2. Регулировка усилия прижима производится грузом-противовесом 4.

Механизмы, имеющиеся в конструкции, позволяют инструменту совершать сложные качания – осцилляцию. Продольная осцилляция позволяет перекрыть зону продольного шва, а поперечная – зону кольцевого шва. При качании инструмента в сторону подачи на строку снимается дополнительный объем металла, а при качании в обратном направлении инструмент накатывается на предыдущий остаточный гребешок, частично его срезая. Одновременно осцилляция способствует самозатачиванию инструмента, уменьшает засаливание абразивного круга, улучшает условия отвода стружки и абразивных отходов из зоны резания. Зона обработки блоком из двух кругов составляет 80 мм.

### 2.3.6. ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕГАБАРИТНЫХ И НЕЖЁСТКИХ ОБЕЧАЕК

В случае необходимости изготовления готовых (не требующих последующей сборки) обечайек повышенных габаритов (> 20 000 мм) используют метод «временного деформирования».

Метод состоит в следующем. Заготовку поперечные размеры обечайки уменьшают за домкратами, наворачиванием на планшайбы. Наружная кромка закрепляется с помощью замыкающий продольный стык варят начальные размеры за счёт упругих свойств толщины листа до 40 мм.

Нежесткие обечайки ( $S / D_{вн} \leq 0,01$ ) в поперечного сечения под действием

По мере увеличения длины вылета, кривизна выходной ветви уменьшается (1, 2, 3), а затем лист теряет устойчивость (4) – рис. 93, а.

Для оценки устойчивости обечайки в процессе гибки в валковых машинах предложено эмпирическое выражение

$$\frac{2,3D^2}{10^6 h} \leq 1,$$

где  $D = 2R$  – диаметр заготовки, мм;  $h$  – толщина заготовки, мм.

Если лист не теряет резко устойчивость (рис. 93, б), то под собственным весом сильно изгибается (3, 4). В таком случае используются специальные приспособления, обеспечивающие сохранение заданной цилиндрической формы обечайки (рис. 94), которые имеют: 1 – поддерживающее устройство; 2 – телескопические опоры.

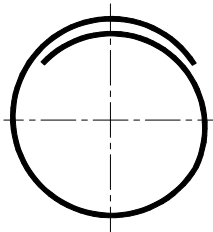


Рис. 92. Нахлест кромок

вальцуют до необходимых размеров, а затем счёт деформирования с помощью петли троса. При этом образуется нахлест кромок (рис. 92). планок, привариваемых к обечайке.

уже на монтажной площадке. Обечайка принимает материала. Метод используют для обечайек с

процессе гибки способны менять форму собственного веса.

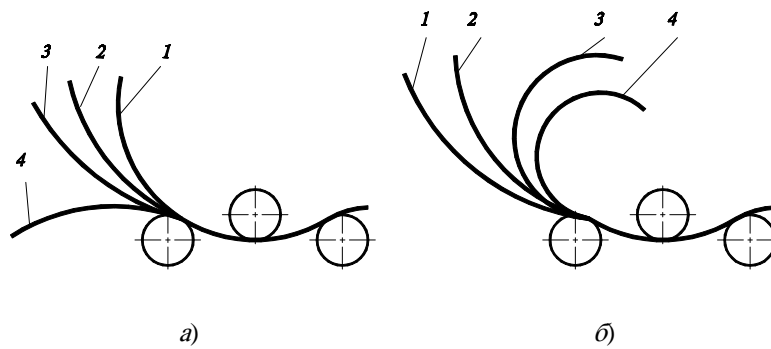


Рис. 93. Дефекты при гибке нежестких обечайек

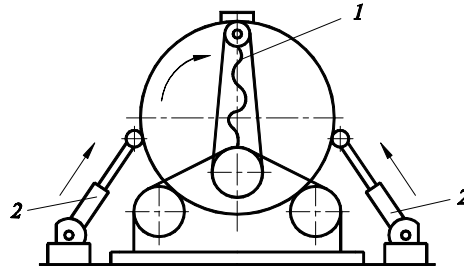


Рис. 94. Устройство для гибки нежестких обечайек

При проведении токарной обработки и сверления отверстий в таких обечайках, обязательно применяют разжимные кольца, которые придают обечайке необходимую жесткость.

#### 2.4. КОРПУСА (ТОЛСТОСТЕННЫЕ ОБЕЧАЙКИ)

Для аппаратов, работающих в условиях высоких давлений ( $P > 10$  МПа) или вакуума, изготавливаются корпусные детали с толщиной стенки до 200 ... 300 мм. Учитывая также значительные диаметры этих изделий (до 20 000 мм), применяются специальные способы их изготовления. Основные типы корпусов:

а) *кованые корпуса*. При небольших диаметрах толстостенных корпусов используют цельнокованые конструкции – баллоны. С увеличением размера – ковано-сварные, которые изготавливают по следующему маршруту:

- округление слитков в нагретом состоянии;
- прошивка отверстия на прессе (инструмент – «прошивень») под нагревом;
- вытяжка (раскатка) кольцевой заготовки на оправке и разгонка её по длине. Можно совмещать ковку с раскаткой на специальных радиально-вальцовочных станках;
- термообработка (закалка или нормализация с отпуском);
- механическая обработка (токарная).

Данная технология приводит к большому расходу материала, так как вес заготовки в два и более раза превышает вес готового корпуса;

б) *штампованные корпуса*. В этом случае корпуса изготавливаются из двух полуобечайек, формовка которых проводится на мощных прессах. Затем, после обработки кромок (строгание, точение), проводят сварку продольных швов. Чаще всего для этого применяют электрошлаковую сварку в вертикальном состоянии;

в) *корпуса из ряда труб с последовательно увеличивающимися диаметрами* изготавливаются из механически обработанных труб, которые последовательно насаживаются друг на друга. Предварительный нагрев охватывающей трубы обеспечивает требуемую посадку поверхностей с гарантированным натягом. Торцы заготовки обваривают и обтачивают на токарно-карусельных станках;

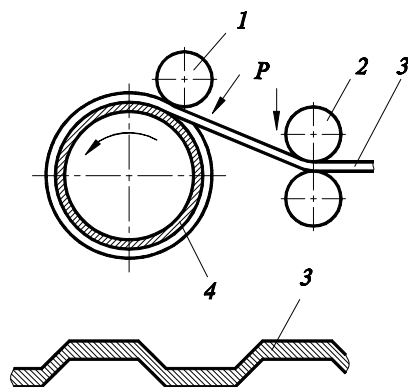
г) *составные корпуса* изготавливаются из ряда увеличивающихся по размеру полуобечайек, стягиваемых между собой при помощи тросов или лент с последующей сваркой продольного стыка. При этом каждый последующий продольный шов сдвигают относительно предыдущего на расстояние не менее 200 мм. Обжатие полуобечайек (регулируемое по слоям) и усадка продольных сварных швов при их остывании создают во внутренних слоях стенки сжимающие кольцевые напряжения, а в наружных обечайках – растягивающие. Это способствует равномерности напряжений в стенке при рабочих условиях – внутренним давлением среды;

д) *витые корпуса* изготавливаются при использовании специальной навивочной машины (рис. 95) по следующему маршруту:

- протачивание на наружной поверхности цилиндрического сердечника 4 спиральной канавки, соответствующей профилю ленты;
- навивка профильной ленты 3 с запрессовкой её с помощью прижимного ролика 1;
- обработка (точением) торцевой поверхности;
- напрессовка бандажей (колец жесткости).

Для навивки применяется лента шириной  $S$  от 60 ... 100 мм и толщиной  $\sim 0,1S$ , набегающий участок которой нагревают до температуры 700 ... 800°C. После запрессовки лента охлаждается сначала струёй воздуха, а затем водой. Заклинивание гребней ленты в пазах предотвращает продольное сокращение при остывании и сохраняет радиальное обжатие внутренней трубы. Навивку производят слоями со сдвигом каждого последующего слоя на  $1/3S$  и с закреплением сваркой.

Общими преимуществами многослойных корпусов (в, г, д) являются: устранениековки при изготовлении цилиндрической части; минимальное количество отходов; возможность использования углеродистых сталей в аппаратах для агрессивных сред; возможность достижения значительных габаритов по диаметру и толщине; экономичность изготовления;

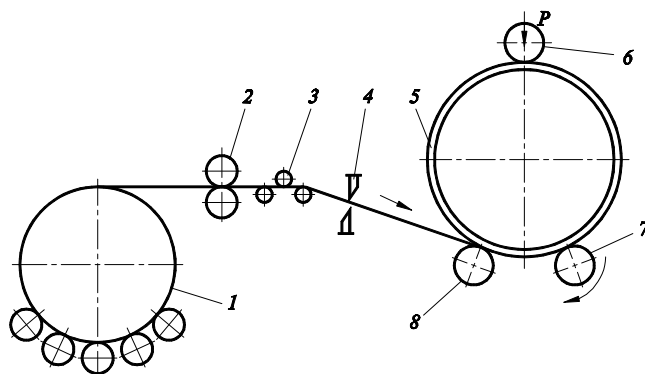


**Рис. 95. Схема работы навивочной машины:**

1 – прижимной ролик; 2 – направляющие ролики; 3 – профильная лента;  
4 – внутренняя труба (сердечник)

е) *рулонированные корпуса*. Наиболее прогрессивная технология изготовления многослойных корпусов реализуется при изготовлении рулонированных корпусов. Впервые разработанные фирмой «Мицубиси» (Япония) они нашли широкое применение в практике. В России изготавливаются на АО «Уралхиммаш» по оригинальной технологии. Схема изготовления рулонированных сосудов показана на рис. 96.

Рулонированные корпуса состоят из внутренней обечайки (гильзы) с плотно намотанной на неё тонкой рулонной сталью и внешнего кожуха.



**Рис. 96. Схема изготовления рулонированных сосудов**

Технологический маршрут включает следующие стадии.

1. Изготовление внутренней гильзы 5 (обечайки) (рис. 96) ведётся по ранее рассмотренной типовой технологии. Толщина проката 10 ... 15 мм. Допускаемая овальность  $a$  определяется как

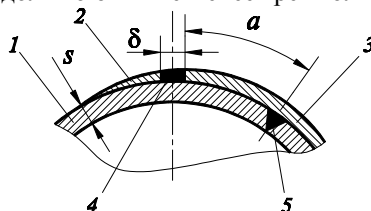
$$a = \frac{2(D_{\max} - D_{\min})}{D_{\max} + D_{\min}} \cdot 100 \%,$$

где  $D_{\max}$ ,  $D_{\min}$  – наибольший и наименьший замеренные диаметры.

Значение  $a \leq 0,5\% D_{\text{вн}}$  обеспечивается калибровкой обечайки после сварки продольного шва.

2. Фиксация рулонной стали 1 на внутренней обечайке 5 производится с использованием стального листа скошенного по толщине, который служит для заполнения клиновидного зазора между поверхностью обечайки и концом первого слоя намотки. Схема крепления показана на рис. 97.

3. Для качественной сварки элементов 1, 2, 3 оставляют зазор  $\delta$  в пределах 6 ... 12 мм, а расстояние между швом 4 и продольным швом 5 внутренней обечайки –  $a$  должно быть не менее трёх толщин последней, т.е.  $a \geq 3S$  (рис. 97).



**Рис. 97. Узел рулонированного корпуса:**

1 – внутренняя обечайка; 2 – клиновидная вставка; 3 – рулонная полоса;  
4 – сварной шов; 5 – сварной шов внутренней обечайки



4. Навивка рулонной полосы ведётся на специальной намоточной машине, работающей по 3-х валковой схеме. Рулонная сталь 1 (рис. 96) разматывается с барабана, проходит через сжимающие 2 и листопрямительные 3 валки и перемещается при помощи валков, причём два из них (7 и 8) расположены под внутренней обечайкой, а один 6 – над ней. Один из нижних валков, например 7, является ведущим, а верхний 6 – нажимным. Деформация  $\Delta$  обечайки под действием нажимного валка 6 определяется как

$$\Delta \geq \frac{[\sigma] D_{\text{вн}}}{E},$$

где  $[\sigma]$  – допускаемые напряжения стали рулонной полосы, МПа;  $D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр, мм;  $E$  – модуль упругости, МПа; (для стали  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа).

Такая схема намотки позволяет достигнуть плотности прилегания ленты по слоям и устранить телескопичность (сход полосы). Качеству намотки также способствует некоторое натяжение набегающей ленты.

5. После окончания намотки рулонная сталь обрезается ножницами 4 и через клиновую вставку фиксируется (сварка) на корпусе. Намотанную заготовку вставляют во внешний кожух толщиной 5–6 мм (зазор не более 0,3 мм), края которого заваривают и торцы обрабатывают механическим путём (токарно-карусельная операция).

С целью уменьшения монолитных кольцевых швов, существует технология спиральной навивки рулонной ленты (спирально-рулонированные корпуса).

Рассмотренная выше технология позволяет примерно в 2 раза снизить расходы на изготовление толстостенных корпусов по сравнению с составными, повысить надёжность их эксплуатации.

## 2.5. КОНСТРУКЦИИ ДНИЩ

По конструкции днища классифицируются следующим образом (рис. 98):

1. Эллиптические днища – наиболее распространены при изготовлении аппаратов с отношением  $H / D_b \geq 0,2$ . Основные геометрические параметры:  $D_b$  – внутренний диаметр днища;  $H$  – высота днища;  $R, r$  – радиусы кривизны;  $S$  – толщина днища.
2. Торосферические (коробовые) днища, мм

$$r = 0,1 \dots 0,2 D_b, \quad R \approx D_b.$$

3. Полушаровые (сферические) лепестковые или целые.
4. Конические днища.
5. Плоские днища.
6. Тарельчатые днища (применяются редко!).

По технологическому признаку днища делятся на:

- а) тонкостенные  $D_b / S > 230$  или  $S = 0,01 D_b$ ;
- б) толстостенные  $D_b / S < 25$ ;
- в) жёсткие  $D_b / S < 100$ ;
- г) нежёсткие  $D_b / S > 100$ .

Последовательность проведения технологических операций при изготовлении днищ такая же, как и для обечайек. Различие состоит в операции формования, которая осуществляется одним из рассмотренных ниже способов.

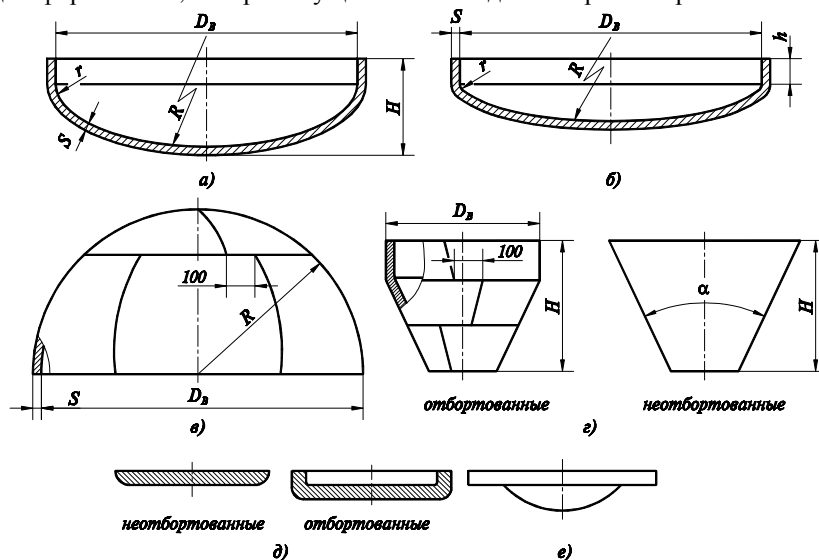


Рис. 98. Конструкции днищ

### 2.5.1. МЕТОД ШТАМПОВКИ НА ПРЕССАХ

Производится обычно в горячем состоянии. Заготовка нагревается и по рольгангу подаётся к штампу. Штамп состоит из протяжного кольца (матрицы *1*) и пуансона, состоящего из «грибка» *2* и формующего кольца *3* (рис. 99).

Такая конструкция пуансона позволяет облегчить снятие напрессованной (за счёт быстрого охлаждения) заготовки при обратном ходе пуансона.

Тем не менее, термическая усадка является основным недостатком горячей штамповки. К ним также относится значительный угар металла в процессе нагрева. Обеспечение требуемой температуры заготовки также представляет большую сложность, так как при транспортировке и закреплении заготовки в штампе теряется значительное количество тепла. Как следствие – высокий расход топлива (400 ... 480 м<sup>3</sup> природного газа для 1 т продукции). Способствует снижению окалинообразования (в 2 раза), а также улучшению условий трения при штамповке применение специальных силикатных покрытий, которые наносятся на заготовку перед её нагревом. Стекло при высокой температуре переходит в вязкое состояние, образуя при этом сплошную газонепроницаемую плёнку. Стеклопокрытие, действуя как смазка, на 40% снижает усилие деформации, требуемое для формования днища.

Штамповка днищ в холодном состоянии проще по реализации в промышленных условиях. Вместе с тем она требует более дорогой стали для штамповой оснастки (матрицы, протяжные кольца), необходимости термической обработки после штамповки для снятия наклёпа, а также последующей правки после термообработки.

Главными же причинами, сдерживающими широкое использование холодной штамповки при изготовлении днищ аппаратов, являются высокие остаточные напряжения, которые вызывают трещины в металле. Особенно это проявляется у сталей, имеющих в своём составе хром. Повышению качества днищ при штамповке способствует совершенствование конструкции оснастки.

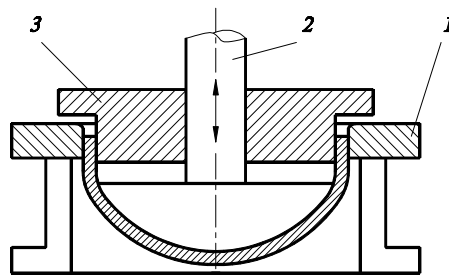


Рис. 99. Схема горячей штамповки днищ

Так интерес представляет конструкция матрицы со скошенной кромкой вместо традиционно закруглённой (рис. 100).

Несложное конструктивное изменение (оптимальный угол конусности  $\alpha \approx 68^\circ$ ) позволяет на 15% снизить утонение заготовки при переходе сферической части днища в цилиндрическую, уменьшить силы трения и, как следствие, физический износ рабочих поверхностей матриц.

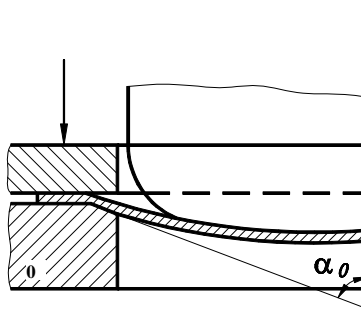


Рис. 100. Схема штамповки в матрицах со скошенной кромкой

Учитывая экспериментально установленный факт о необходимости повышения трения между пуансоном и заготовкой, интерес представляет конструкция рифлёного пуансона. Выступы кольцевого рифления внедряются в поверхность металла заготовки, затрудняют её скольжение, что приводит к уменьшению утонения заготовки.

Одним из методов штамповки, применяемых на практике довольно редко, является *гидровзрывная штамповка*. Применяют данный метод в том случае, когда невозможно использовать ранее рассмотренные способы или необходимо получить днище высокой прочности. Взрыв производят в бетонных ёмкостях – кессонах.

### 2.5.2. МЕТОД РОТАЦИОННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ (СПИНИНГОВАНИЕ)

Метод заключается в том, что формообразование днищ производится роликами с малой зоной пластической деформации, локализованной на незначительной части вращающейся заготовки. Деформация заготовки осуществляется на универсальных давяльных станках вертикального и горизонтального исполнения. Оснастка (сменная) состоит из оправки *1*, прижимной шайбы *2* и давяльных роликов *3* (рис. 101). Оправки изготавливают для каждого типоразмера литём, штамповкой, механической обработкой из стали, чугуна, твёрдого дерева.

Диаметр оправки меньше номинального диаметра на величину  $2S$  и двойной величины пружинения материала после выдавливания –  $2\alpha$ .

$$D_{\text{опр}} = D_b - 2S - 2\alpha,$$

где  $S$  – толщина заготовки, мм.

Давильные ролики изготавливают из стали, капрона (для меди, алюминия).

Процесс выдавливания на давательных станках предусматривает перемещение давательного ролика от центра к периферии при вращении оправки с заготовкой. На давательных станках предусмотрена также подрезка кромок днища (токарная операция).

При формировании днищ роликами без нагрева заготовки её выпуклую часть предварительно штампуют на прессе.

Неглубокие днища при единичном производстве выдавливают без оправки с помощью опорного ролика 1, вращающегося от самостоятельного привода. Шпиндель станка 3 и прижимная шайба 2 предназначены лишь для закрепления заготовки, но не для передачи крутящего момента (рис. 102). По такой схеме работают станки фирм «Болдрини» (Италия) и «Шляйфенбаум-Стайнлянтц» (Германия).

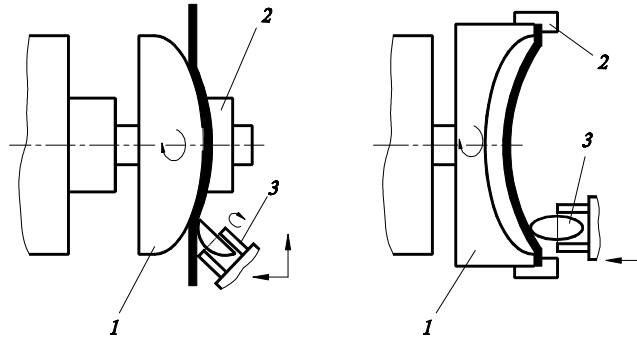


Рис. 101. Схема давательных станков горизонтального исполнения

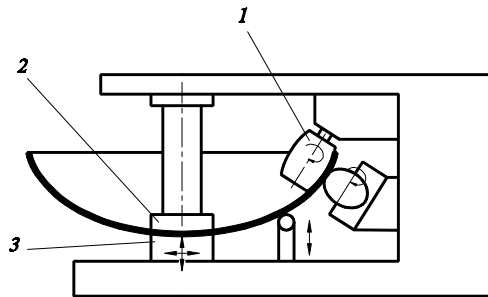


Рис. 102. Схема безоправочного выдавливания днищ

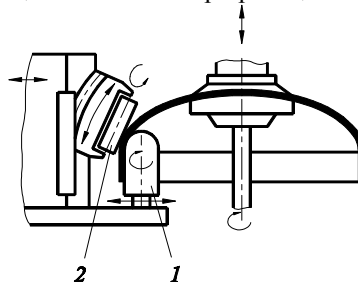
Выдавливание днищ больших размеров и толщины производят на тяжёлых порталных машинах, совмещая эту операцию с горячей штамповкой (рис. 103). Маршрут обработки в этом случае следующий:

- 1) нагрев заготовки;
- 2) штамповка центральной части днищ;
- 3) закатка борта с одновременным завершением формирования центральной части днища;
- 4) отбортовка днища неподвижным бортовочным 1 и неподвижным давательным 2 вальками.

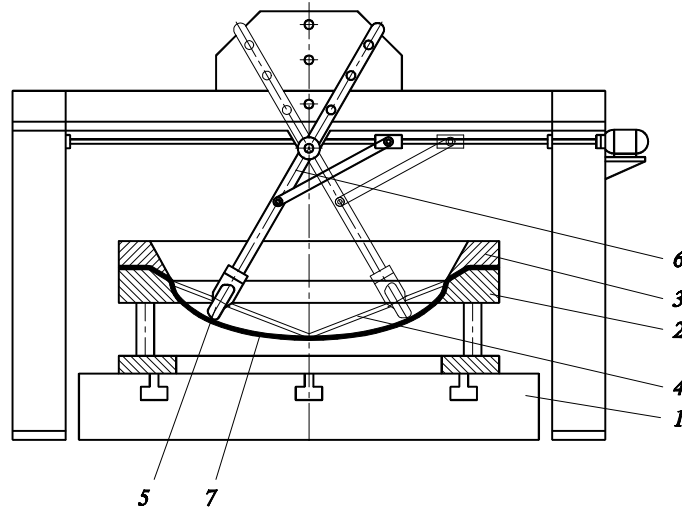
Основным дефектом при изготовлении днищ методом ротационного выдавливания является их разнотолщинность по сечению детали. Использование для уменьшения утонения сменных оправок экономически невыгодно из-за большой металлоёмкости и трудоёмкости изготовления.

Для устранения этого недостатка используются исходные заготовки в виде конуса с высотой, равной 1,1 ... 1,3 высоты днища. Причём, чем больше диаметр днища и пластичней материал, тем меньшей высоты конуса изготавливается заготовка. Это обеспечивает исключение разнотолщинности днища за счёт перераспределения материала по его сечению, а также уменьшение коробления из-за уменьшения напряжений в материале.

Такие заготовки применяют на устройстве, созданном на базе токарно-карусельного станка (рис. 104), на планшайбе 1 которого устанавливают оправку 2, к которой прижимным кольцом 3 фиксируют коническую заготовку 4. Формование происходит за счёт усилия давательного ролика 5, закреплённого на траверсе 6 с возможностью осевого и радиального перемещения. Особенностью данного способа является то, что движение давательного ролика, осуществляемое в плоскости, смещённой относительно центра вращения днища 7, обеспечивает повышение его качества за счёт уменьшения величины упругих деформаций в материале. Эти деформации возникают при ротационной



**Рис. 103. Схема работы портальной машины**



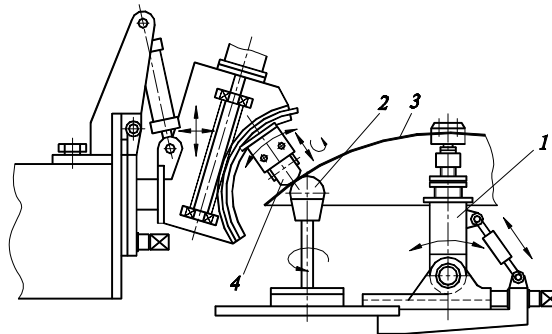
**Рис. 104. Схема работы устройства для ротационного выдавливания днищ**

вытяжке в отсутствии сдвиговых деформаций, которые происходят при проходе давящего ролика через центр заготовки, и после отвода ролика приводят к образованию сферического выступа, направленного внутрь днища. Величину смещения рекомендуется выбирать в диапазоне  $1/8 \dots 1/4$  диаметра накатного ролика.

Применение секционной оправки и регулируемой длины траверсы делает эту конструкцию универсальной (для различных размеров, материалов и толщин заготовки).

Более широкими технологическими возможностями обладает установка для ротационного выдавливания днищ, показанная на рис. 105.

В ней предусмотрено ротационное выдавливание с одновременным изменением высоты и угла наклона шпинделя 1 по отношению к оси вращения опорного ролика 2. Это обеспечивает упрощение технологии за счёт проведения обжима кромки днища 3 без его перемещения на калибрующий станок ротационной вытяжки. Кроме того, изменение угла наклона шпинделя позволяет изменить направление сдвиговых деформаций на поверхности обрабатываемой детали – чем больше угол наклона, тем больше величина сдвиговых деформаций, и в то же время ниже скорость ротационного выдавливания. Таким образом, при ротационном выдавливании появляется возможность достигать максимального качества поверхности детали даже при значительном разбросе физико-механических свойств материала заготовок.



**Рис. 105. Установка для ротационного выдавливания днищ**

Возможность подачи накатного ролика в радиальном направлении относительно центра сферы опорного ролика 4 позволяет обеспечивать изготовление днищ из листа различной толщины и различной пластичности материала. При этом достигается более высокая чистота поверхности при выпуске партии днищ из одинакового материала.

Основные преимущества способа изготовления днищ аппаратами спинингованием (в условиях единичного и мелкосерийного производства) по сравнению со штамповкой на прессах следующие:

- значительно меньшая стоимость, из-за меньшей массы и размеров оборудования;
- почти в 5–6 раз меньшая продолжительность переналадки оборудования;
- более высокое качество и точность изделия;
- универсальность машин (на машине Rubo-25 (Италия) изготавливают днища диаметром 1300 ... 3800 мм и толщиной 8 ... 30 мм);
- простота оснастки и её низкая стоимость.

На уникальных порталных машинах в США, Японии, Великобритании получают днища диаметром до 9000 мм и толщиной до 165 мм.

### 2.5.3. ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ДНИЩ

Штамповка тонкостенных днищ ( $S < 2$  мм) затрудняется склонностью заготовки к складообразованию и их низкой механической прочностью. Поэтому требуется предварительное прижатие заготовки 1 по периферии и протяжному кольцу 2 фланцем 3 специальной конструкции (рис. 106).

Используют также пресс двойного действия с наружным и внутренним ползунами, который выполняет две самостоятельные операции: прижим заготовки 1 к штампу 2 и вытяжку. После прижима заготовки внутренний плунжер 3 действует независимо от наружного 4 (рис. 107).

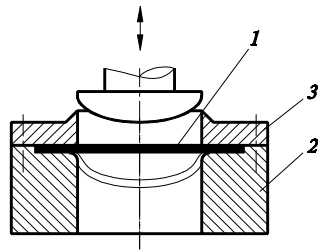


Рис. 106. Штамповка тонкостенных днищ

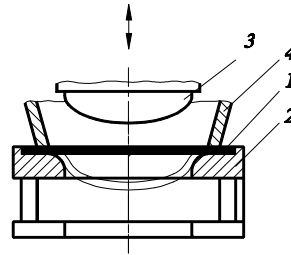


Рис. 107. Схема работы прессы двойного действия

Надёжная фиксация заготовки обеспечивается при использовании оснастки показанной на рис. 108. В этом случае вытяжка днища также разделяется на 2 этапа: штамповка плоского днища прижимным кольцом 1 с предварительной вытяжкой центральной части заготовки и окончательная штамповка днища пуансоном 2.

Применение в практике аппаратостроения находит также штамповка в полиуретановые (резиновые) матрицы и гидравлическая вытяжка тонкостенных днищ (рис. 109). Требуемое давление жидкости достигает 40 МПа.

Новым направлением в совершенствовании оборудования для изготовления тонкостенных днищ является обеспечение переменного по величине усилия прижатия заготовки по мере её формования. Это позволяет существенно снизить дефекты при изготовлении.

Установка (рис. 110), в которой наряду с гидравлическим прессом двойного действия входит также регулирующий клапан 1 и копирная линейка 2, закреплённая на штанге 3, для снижения усилия от веса подвижных частей прижимного ползуна 4 (их вес достигает 1400 кН) предусмотрены подъёмные цилиндры 5, управляемые с помощью насосной станции и клапана 7.

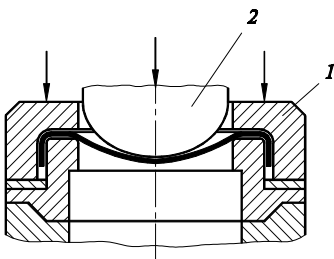


Рис. 108. Штамповка тонкостенных днищ с использованием специальной оснастки

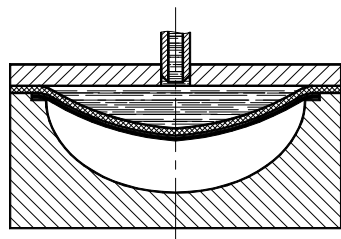


Рис. 109. Гидравлическая вытяжка днищ

Меняя рабочий профиль копирной линейки, можно получить практически любой закон изменения усилия прижима, при этом практически полностью устранить дефекты штамповки и снизить утонение стенки днища.

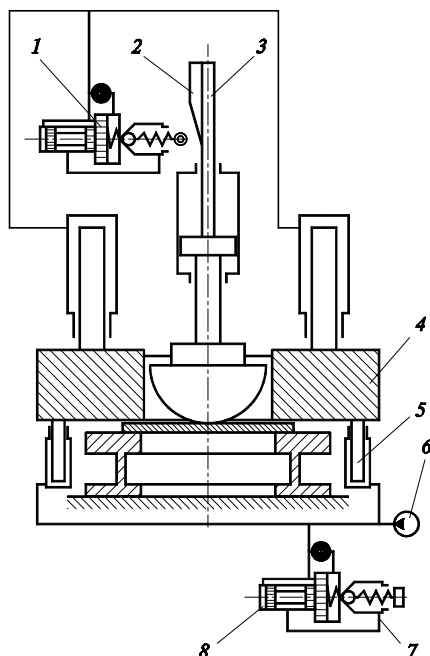


Рис. 110. Устройство для штамповки с переменным усилием прижима заготовки

### 2.5.4. КАЛИБРОВКА ДНИЩ

В аппаратостроении днище является базовой деталью. Поэтому требуется высокая точность размеров и формы заготовки, которая бы гарантировала качественную сборку днища с обечайкой. С этой целью после технологического процесса формования днища проводят её калибровку (правку), чаще в холодном состоянии.

Одним из методов калибровки является охлаждение днища после штамповки на калибровочном кольце (рис. 111). Сущность способа заключается в следующем. После завершения штамповки днище 1 надевают на калибровочное кольцо 2, имеющее пустотелую камеру 3, куда подаётся хладагент, с помощью привода 4. При этом происходит равномерное охлаждение днища, и сохраняются наружный диаметр которого равен диаметру при помощи гидроцилиндра

Применение данного (на 10 ... 15%) повысить точность формы (овальность) изделия.

Наряду с методом раздачи для этой цели применяют штамповую следующую конструкции (рис. 112).

Пуансон выполнен в виде кольца с кривизной рабочей поверхности, соответствующей кривизне калибруемого днища. Отношение высоты пуансона  $H_k$  к его диаметру  $D_n$  в зависимости от размера днища находится в пределах 0,15 ... 0,25. Такая конструкция пуансона не требует больших затрат на изготовление и позволяет использовать для калибровки прессы простого действия с небольшой открытой высотой.

Калибровка днищ осуществляется следующим образом. Днище 2 устанавливают в рабочее пространство штампа. После этого его центрируют относительно матрицы и с помощью пуансона, закреплённого в верхней траверсе прессы, калибруют обжимом через протяжное кольцо.

Диаметр калибрующего пуансона определяют как

$$D_n = D - K,$$

где  $D = D_0 - \Delta D$  – номинальный диаметр днища, мм;  $\Delta D$  – величина предельного отклонения, мм;  $K = \frac{\sigma_r}{E} D_0$  – коэффициент упругого пружинения.

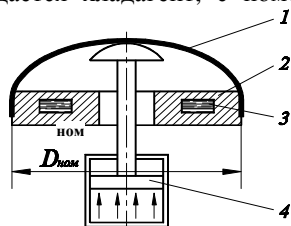


Рис. 111. Способ

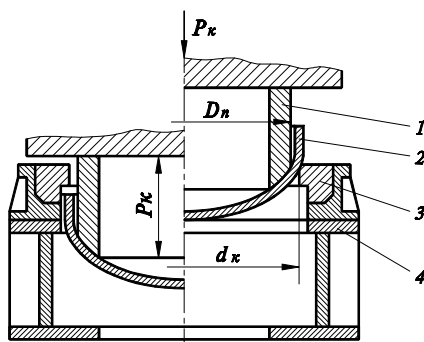


Рис. 112. Схема калибровки днища обжимом

Диаметр протяжного кольца

$$D_k = D_n - 2S_1,$$

где  $S_1 \approx 1,1S$  – толщина борта штампованного днища, мм;  $S$  – толщина днища, мм.

Одним из эффективных способов калибровки днища является его пластическое обжатие с помощью специальной оснастки. Например, сходящимися коническими секторами на гидравлическом прессе (рис. 113, а). При опускании кольца 3 ползуны 2 сдвигаются его внутренней конической поверхностью к центру штампа, равномерно обжимая при этом цилиндрическую часть днища 1.

Более удачно задача пластического обжатия цилиндрической части эллиптических днищ решается в схеме с применением кривошипно-шатунного механизма и сходящихся ползунов-секторов (рис. 113, б). В данном случае используется принцип кривошипно-шатунного механизма, где шесть (может быть и больше) калибрующих ползунов 4 соединены с поворотным кольцом 3 шатунами 2.

Усилиями  $P$  гидроцилиндра кольцо 3 поворачивается, сдвигая ползуны 4 шатунами 2 к центру механизма. Цилиндрическая часть днища равномерно обжимается ползунами 4 до диаметра, равного диаметру внутренней поверхности ползунов. При повороте кольца 3 в обратном направлении ползуны 4 расходятся, освобождая днище 1.

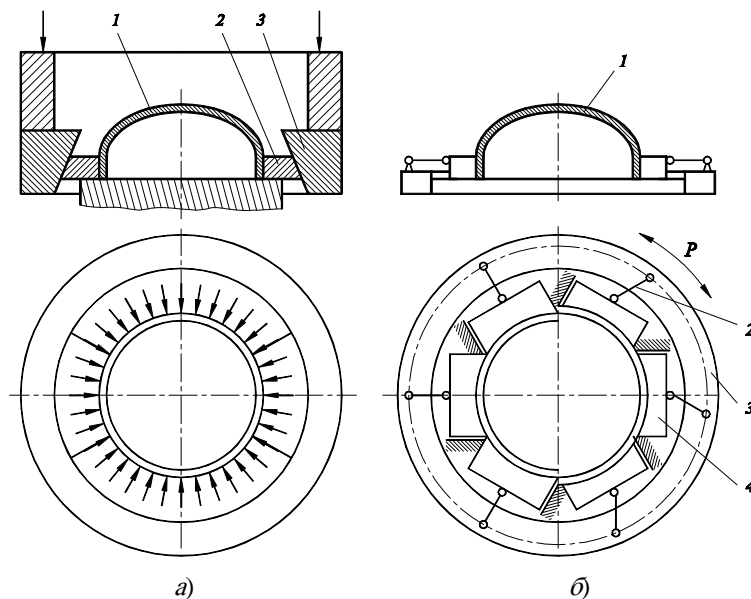


Рис. 113. Калибровка днищ пластическим обжимом

С учётом эффекта упругого пружинения заготовки после снятия нагрузки, диаметр рабочей поверхности ползунов выполнен меньше требуемого диаметра днища

$$D_n = \frac{D_n}{1 + \frac{\sigma_p}{E}},$$

где  $D_n$  – внутренний диаметр рабочей поверхности ползунов в сжатом состоянии, м;  $D_n$  – необходимый наружный диаметр цилиндрической части днища, м;  $\sigma_p$  – достигаемое рабочее напряжение в материале днища при обжатии до заданной степени деформации, МПа;  $E$  – модуль продольной упругости материала днища, МПа.

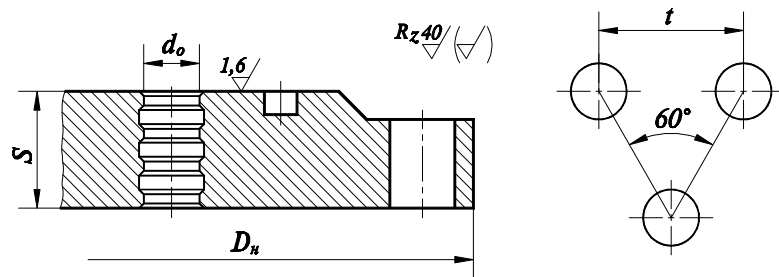
После завершения операции формования и калибровки днища проводят следующие операции:

- разметка для подрезания торца;
- подрезка торца, которую осуществляют с помощью газоплазменного резака с последующей обработкой этой поверхности на токарно-карусельном станке;
- дробеструйная обработка, очистка путём травления и пассивирования поверхности готовой детали.

## 2.6. ТРУБНЫЕ РЕШЁТКИ

Трубные решётки являются одними из важнейших деталей теплообменной аппаратуры. В решётках закрепляются трубы, а сами решётки чаще всего приваривают к корпусу аппарата или фиксируют с помощью фланцевого соединения.

Основные геометрические размеры этой детали:  $D_n$  – наружный диаметр;  $S$  – толщина;  $d_0$  – диаметр отверстий под трубки. Размеры параметров находятся в следующих диапазонах:  $D_n = 530 \dots 3690$  мм;  $d_0 = 25, 38, 57$  мм. Число канавок в отверстиях трубных решёток: 1 – ( $S_{тр} < 26$  мм) и 2 – ( $S_{тр} > 26$  мм).



**Рис. 114. Конструкция трубной решетки**

Твёрдость материала решётки должна быть выше, чем у труб. Отклонение расстояний между центрами отверстий меньше  $\pm 0,5$  мм и меньше  $\pm 1,0$  мм для любой суммы шагов. Неплоскостность 2 мм / 1 м диаметра. Трубные решётки бывают сварные и цельные. Материал: углеродистые стали, легированные стали, цветные металлы. Заготовки – листовой прокат.

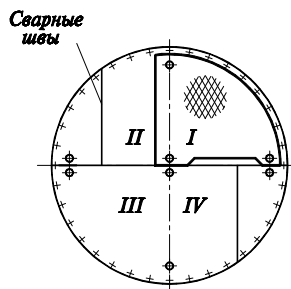
Типовой маршрут обработки включает следующие группы операций:

- 1) расконсервация, очистка, разметка, резка проката;
- 2) обработка кромок, сварка карт, термообработка;
- 3) точение (токарно-карусельная) за 2 установка;
- 4) фрезерование пазов (для 2 ... 4-х ходовых теплообменников). В эти пазы устанавливают перегородки;
- 5) разметка отверстий под сверление. При разметке отверстий необходимо исключить их попадание в зону сварных швов.

Учитывая, что рассматриваемая деталь имеет большое количество отверстий различного назначения, эта операция проводится с максимальной точностью и в определённой последовательности.

Рассмотрим её для случая сварной трубной решётки с достаточно большими габаритами. Необходимо:

- а) нанести центральные оси (одну из них перпендикулярно сварному шву) с выносом на цилиндрическую поверхность (рис. 115);
- б) наложить шаблон для закрашивания мест, не подлежащих сверлению, и контур крайних крепёжных отверстий. Закрасить указанные места меловой краской;
- в) разметить центры крепёжных отверстий и центрального отверстия (если его нет, то двух отверстий  $d_0 = 20$  мм) под установку кондуктора;
- б) сверление отверстий. Для лучшего совпадения отверстий в решётках их сверлят попарно в собранном виде при обязательном



**Рис. 115. Схема сверления отверстий в трубной решётке**

совмещении центральных линий. Сверление проводится также в строго определённой последовательности:

- а) установить на закрашенную решётку незакрашенную, подложить под них мерные пластины, совместить оси, закрепить струбцинами;
- б) сверлить два отверстия  $d_0$  или центральное отверстие под установку кондуктора. В некоторых случаях разрешается сверление центрального отверстия с последующей его заваркой;
- в) установить кондуктор на I четверть и закрепить на штыре;
- г) сверлить ещё два отверстия и установить в них штыри, заглушить отверстия, не подлежащие сверлению;
- д) зацентрировать остальные отверстия по кондуктору;
- е) повторить пп. в, г, д на II, III, IV четвертях решётки;
- ж) сверлить отверстия под трубы и крепёж;
- з) зенкеровать отверстия, снять фаски с обеих сторон решётки (проводится при отсутствии кондуктора).

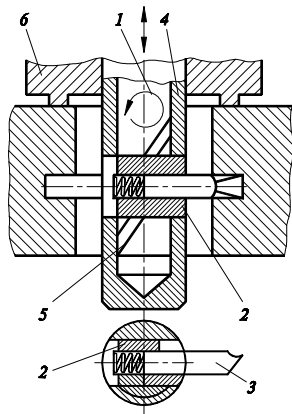
Сверление производят на радиально-сверлильных многошпиндельных станках, применяя, в случае необходимости, сверла для глубокого сверления (ружейные, однокромочные, эжекторные и т.д.). В обязательном порядке применяют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ).

На практике используются, к примеру, 10-шпиндельный станок МА-50 с программным управлением, 15-шпиндельный станок 1С52 (до 38 мм и  $S$  до 128 мм) и др.;

- 7) растачивание уплотнительных канавок и фасок в отверстиях под трубы.



Проводят эту операцию на тех же станках, что и сверление. Растачивают канавки при помощи специальной оправки. Принцип её работы заключается в том, что вертикальное перемещение скалки 1 в корпусе оправки 4 вызывает перемещение призмы 2 по направляющим 5, а, обрабатывая канавку только после того, как поверхность решётки коснётся опорное кольцо 6 и дальнейшая подача



следовательно, и резца 3 (рис. 116). Резец начинает того, как поверхности решётки коснётся опорное шпинделя вызовет смещение вниз скалки 1. установлено два или три резца в зависимости от

числа канавок.

Одним из методов обработки дорнование, которое проводят сферический, закрепляется в оправке этом необходимо обеспечить мм. Следует отметить, что зенкер (рис. 117).

Зенкерование одного отверстия дорнование в этих условиях – 6 – 8

отверстий в трубных решётках является вместо зенкерования. Дорн 2, как правило, 1 и продавливается через отверстие в решётке 3. При гарантированный натяг в зоне обработки – 0,2 ... 0,4 инструмент (дорн) в 40 – 45 раз дешевле, чем

в решётке с  $S = 150$  мм занимает примерно 1 мин, а с.

Рис. 116. Конструкция оправки для растачивания канавок

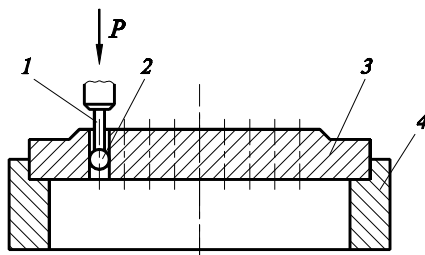


Рис. 117. Схема дорнования отверстий:

1 – оправка; 2 – дорн (шарик); 3 – решётка; 4 – подставка-опора

## 2.7. СБОРКА ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

В общем объёме продукции аппаратостроения теплообменники занимают около 30%. Разнообразие условий, в которых работают теплообменные аппараты, является причиной существования множества различных конструкций и, соответственно, технологий, применяемых для их изготовления.

По конструкции теплообменники делятся на:

- |                      |  |
|----------------------|--|
| – кожухотрубчатые    | Поверхность теплообмена изготовлена из труб  |
| – типа труба в трубе |  |
| – витые              |  |
| – змеевиковые        |  |
| – пластинчатые       | Поверхность теплообмена изготовлена из листа |
| (матричные)          |  |
| – панельные          |  |
| – спиральные         |  |
| – блочные            |  |

Из общего объёма теплообменников: 80% кожухотрубчатые; 8% труба в трубе; 12% – остальные. Учитывая, что кожухотрубчатые теплообменники наиболее распространены, рассмотрим особенности технологии их сборки. Одна из схем аппарата представлена на рис. 118.

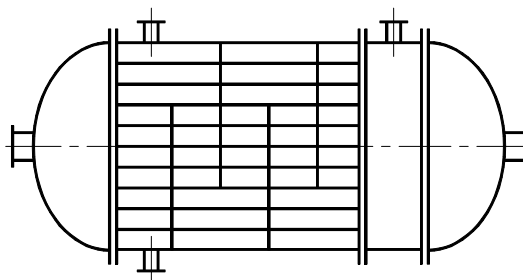
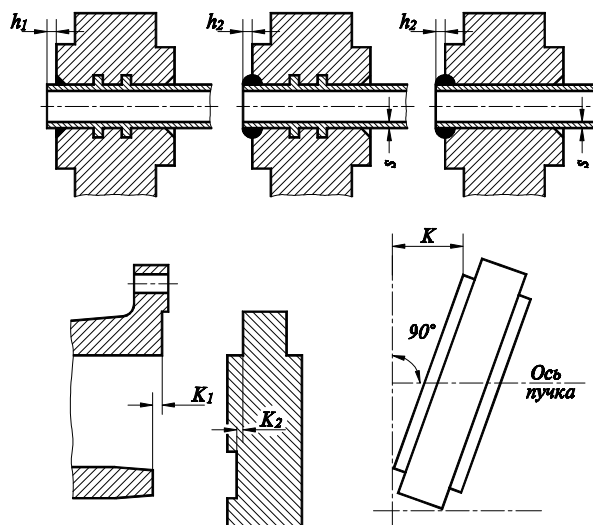


Рис. 118. Схема конструкции кожухотрубчатого теплообменника

Технология сборки кожухотрубчатых теплообменников включает в себя целый ряд операций, в результате которых отдельные узлы и детали соединяются в готовые изделия. Особые требования к точности сборки касаются в первую очередь узлов соединения трубного пучка с решёткой и решётки с корпусом теплообменника.

Предельные отклонения размеров в местах крепления труб к решётке не должны превышать  $h_1 = 2 \pm 5$  мм;  $h_2 = 1,5 \pm 1 + 1$  мм. Отклонение от перпендикулярности торца трубки не более 1 мм (рис. 119).



**Рис. 119. Нормируемые отклонения деталей узлов теплообменника**

Несовпадение плоскости под прокладку у перегородки с плоскостью под прокладку во фланце ( $K_1$ ) и несовпадение плоскости в выточке в трубной решётке относительно кольцевой привалочной поверхности под прокладку ( $K_2$ ) не должны превышать следующих величин:

$K_1$  и  $K_2 = 0,3$  мм для аппаратов  $D$  до 1200 мм;

$K_1$  и  $K_2 = 0,4$  мм для аппаратов  $D$  до 1400 мм;

$K_1$  и  $K_2 = 0,5$  мм для аппаратов  $D > 1600$  мм.

Предельные отклонения от перпендикулярности трубной решётки к оси пучка должны быть не более 1 мм для  $D$  до 1000 мм; 1,5 мм для  $D$  до 1500 мм и 2 мм для  $D > 1500$  мм.

Предельные отклонения расстояния между центрами двух соседних отверстий в решётках –  $\pm 0,25$  мм и  $\pm 0,5$  мм на любую сумму шагов.

Примерный маршрут изготовления кожухотрубчатых теплообменников включает последовательное выполнение следующих групп операций:

- 1) сборка обечайки с установкой и приваркой штуцеров и опорных лап;
- 2) сборка трубного пучка (сборка и сварка обечайки с трубной решёткой; установка труб в решётку; вальцовка труб с двух сторон; торцевание концов труб);
- 3) испытания (гидравлические испытания на пробное давление межтрубного пространства, а также пневматическое испытание рабочим давлением с погружением трубного пучка в ванну с водой);
- 4) сборка крышек;
- 5) сборка трубного пучка с крышками;
- 6) гидроиспытание трубного пространства на пробное и рабочее давление.

Содержание сборочных операций состоит, как правило, в проведении сварочных работ и в сборке резьбовых соединений, что не представляет особых сложностей.

Одной из специфических и трудоёмких является операция закрепления труб в трубной решётке.

### 2.7.1. СПОСОБЫ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБ В ТРУБНОЙ РЕШЁТКЕ

Данную операцию производят в специальных приспособлениях, которые фиксируют положение трубных решёток друг относительно друга. Сборку ведут в вертикальном положении (при большом числе труб) и горизонтальном (при малом). Перед сборкой поверхности соединяемых деталей подвергают тщательной очистке от ржавчины, грязи и смазки. Концы труб обрабатывают шлифовальными кругами или металлическими щётками. Необходимо также устранить заусенцы, особенно в отверстиях трубной решётки, которые вызывают продольные царапины – причину появления течи в соединении. Для придания дополнительной пластичности концы труб отжигают.

Наиболее часто сборку труб с решётками производят инструментом, называемым механической вальцовкой (операция – развальцовка). Процесс развальцовки заключается в том, что при подаче инструмента внутрь трубы ролики вальцовки 1 (рис. 120) раздвигаются по диаметру конусом (расширителем) 2 и, обкатываясь по внутренней поверхности трубы 3, пластически деформируют металл. Труба при этом увеличивается в диаметре и входит в соприкосновение с поверхностью отверстия в решётке 4. Так как поверхность отверстия является ограничителем, то дальнейшая деформация приводит к образованию плотного контакта сопрягаемых деталей. Конструкции развальцовки весьма разнообразны. Так на рис. 120 показана схема действия вальцовки, предотвращающей проворачивание вальцоваемой трубы 3 посредством штифта 5.

Это позволяет устранить необходимость фиксации противоположного конца трубы. Конструкция данной вальцовки предусматривает также точную величину выхода трубы 3 из трубной решётки 4 (обычно на 4 – 6 мм) на размер глубины впадины в упоре 6. Для развальцовки применяют вальцовочные стенды с одно- и многшпindelными развальцовочными головками полуавтоматического действия. При достижении заданного предельно допустимого крутящего момента, автоматически включается реверс, и вальцовка выходит из трубки.

Существенный недостаток использования для сборки вальцовки заключается в том, что наряду с полезным радиальным нагружением, которое и обеспечивает контакт трубки с решёткой, на трубку действует и осевая составляющая усилия. Это вызывает упругую деформацию трубки в осевом направлении, неравномерную по величине для различных трубок пучка. Следствием данного эффекта является: собственная деформация трубок; «выдёргивание» ранее закреплённых трубок; изгиб и коробление решётки (до 8 / 1000 мм диаметра).

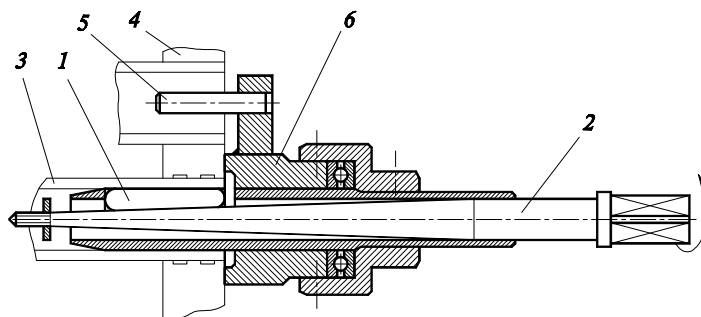


Рис. 120. Развальцовка

В процессе развальцовки наблюдается также перераспределение контактного давления трубки с трубной решёткой из-за разброса геометрических и механических параметров этих деталей. С целью уменьшения влияния этого дефекта на качество сборки применяют различные схемы (последовательность) развальцовки.

Исследованиями установлено, что оптимальная схема развальцовки предусматривает её проведение от периферии к центру. При этом наблюдается минимальное (до 10%) изменение номинального контактного давления в соединении трубок с решёткой.

На практике используются и другие комбинированные схемы развальцовки, одна из которых показана на рис. 121.

Данная схема предусматривает 2 этапа сборки:

I – вальцовку пяти групп трубок по семи в каждой;

II – последовательную вальцовку по рядам, начиная с трубок нижнего ряда.

Степень развальцовки  $K_p$  определяется как:

$$K_p = \frac{(D_T^B - d_T^B) - (d_p - d_T^H)}{d_p} \cdot 100 \%,$$

где  $D_T^B$  – внутренний диаметр трубы после развальцовки;  $d_T^B$  – внутренний диаметр трубы до развальцовки;  $d_T^H$  – наружный диаметр трубы;  $d_p$  – диаметр отверстия в трубной решётке.

При  $d_T^H / \delta > 10$   $K_p = 0,7 \dots 1,6\%$ ; при  $d_T^H / \delta < 10$   $K_p = 2,2 \dots 3,2\%$ . Здесь  $\delta$  – толщина трубки.

Установление режима развальцовки сводится к определению крутящего момента на конусе (веретене) вальцовки при заданных числах оборотов, угле наклона роликов и угле конуса веретена для заданного типоразмера труб. Учитывая выше изложенные недостатки механической развальцовки, на практике применяются другие методы:

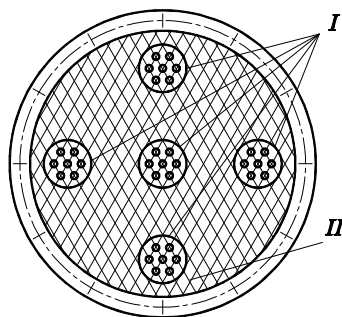
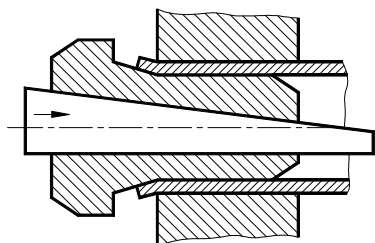


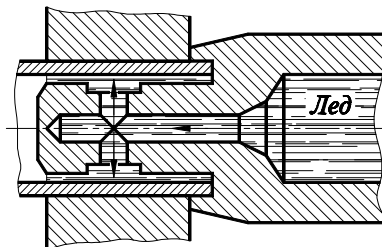
Рис. 121. Схема последовательности развальцовки труб

- механический (запрессовка цанговыми патронами) ( $d_T$  12 ... 60 мм) (рис. 122);
- электровзрывной ( $d_T$  7 ... 25 мм);
- ударными волнами от искровых разрядов в жидкости ( $d_T$  10 ... 18 мм);
- запрессовка энергией химического взрыва ( $d_T$  7 ... 25 мм);
- магнитными импульсными полями высокой плотности ( $d_T$  20 ... 100 мм).

Интересен метод запрессовки с использованием эффекта расширения льда в процессе замораживания хладоносителя (рис. 123).



**Рис. 122. Запрессовка цанговыми патронами**



**Рис. 123. Схема закрепления труб замораживанием хладоносителя**

Указанные выше методы имеют однако ограниченное применение из-за значительных технологических трудностей (сложная оснастка), высоких энергетических затрат и т.д. В то же время в определённых условиях они применяются достаточно эффективно.

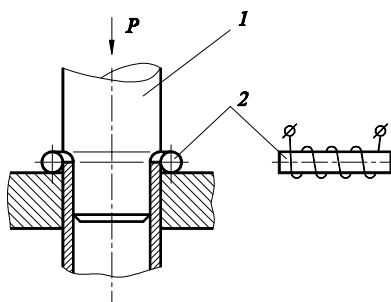
Вальцовка и запрессовка труб обеспечивает переходное соединение, т.е. допускается некоторый сдвиг трубки относительно трубной решётки в процессе эксплуатации (без нарушения герметичности соединения).

Наряду с переходным, соединение труб с решётками бывает также разъёмным (нарезными втулками) и неразъёмным (сварка, пайка).

### 2.7.2. ОБВАРКА ТРУБ В ТРУБНЫХ РЕШЁТКАХ

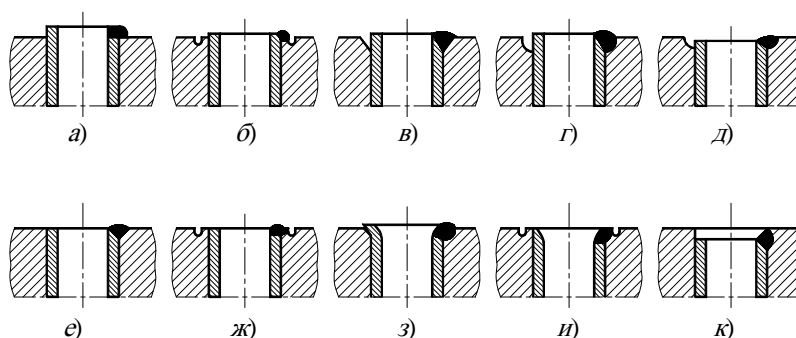
Данная операция применяется для обеспечения надёжной герметизации соединения трубного пучка с решёткой: когда рабочие газы и жидкости ядовиты или радиоактивны, при соединении с воздухом они могут образовать взрывчатые смеси или не допускается их смешение; для увеличения механической прочности соединения; при опасности возникновения коррозии в сопряжении труб с решёткой; в условиях эксплуатации аппарата при высоких давлениях и температурах, а также их резких колебаниях.

Наиболее часто применяется ручная сварка обмазанными электродами. Для тонкостенных труб используют сварку в среде защитных газов. Применяют также автоматическую сварку в среде защитного газа (аргон + углекислота). К современным методам обварки труб в трубных решётках относят индукционную сварку, которая не даёт оплава. Втулка *I* (кварц, вольфрам) и индуктор *2* – основные детали устройства (рис. 124). Расплавленный металл под действием втулки вдавливается в материал решётки.



**Рис. 124. Способ обварки труб в трубной решётке**

Качество обварки во многом определяется правильностью выбора способа подготовки свариваемых концов труб и поверхности решётки. На рисунке 125 показаны некоторые варианты подготовки данных поверхностей и размещение сварных швов.



### Рис. 125. Способы подготовки свариваемых поверхностей и размещение сварных швов

Способы *а, б* применяются в том случае, когда главной задачей обварки является герметизация соединения. Трубы выступают при этом на 1 – 3 мм. Способы *в, г* используются для повышения прочности конструкции. Способы *д, е, ж* применяются при малых расстояниях между отверстиями в решётке, а *б* и *ж* при небольших толщинах решётки и большом количестве труб. При способах *з, и* края отверстий и труб раздаются наружу, что предотвращает уменьшение выходного сечения трубы сварочным валиком.

Следует особо отметить, что сочетание предварительной развальцовки, а затем сварки не может повышать надёжности соединения, так как напряжённое состояние свариваемых кромок может вызвать образование трещин в корне шва.

Проведение развальцовки после сварки также нецелесообразно, поэтому реализуется крайне редко в случае возможной «щелевой» коррозии.

Обварку труб для снижения коробления трубной решётки необходимо вести в определённой последовательности. Одна из рациональных схем такой последовательности показана на рис. 126.

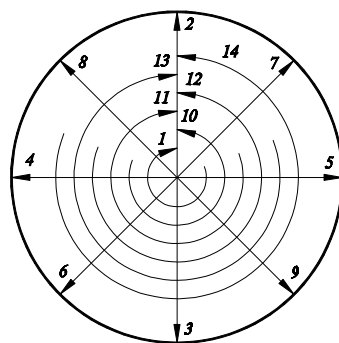


Рис. 126. Последовательность обварки труб

Одним из существенных достоинств сварного метода крепления труб в трубных решётках является значительное (по сравнению с развальцовкой) снижение коробления поверхности решётки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нанотехнологии и наноиндустрия предоставляет российской экономике уникальный шанс для инновационного прорыва во всех сферах народного хозяйства. Уже сейчас область применения углеродных наноматериалов обширна. Это производство полимерных композиционных материалов с применением методов твёрдофазной экструзии и на основе ароматического полиамида (фенилон С-2), различного рода конструкционных композитов на основе эпоксидно-диановых смол, радиопоглощающих покрытий, наномодифицированных материалов строительного назначения, антидетонационных присадок и присадок к моторным маслам, адсорбентов водорода, наномодифицированных мембран и многое другое. Этот список постоянно увеличивается и наступит время, когда нанотехнологии будут не только областью фундаментальной науки, но основой для удовлетворения большинства потребностей населения и промышленных предприятий.

Потребности в продукции наноиндустрии постоянно возрастают, поэтому реализация амбициозных проектов по изменению технологического уклада в промышленности немыслима без современной производственной базы, что в свою очередь предъявляет высокие требования к современному аппаратостроению по внедрению прогрессивных технологий изготовления деталей и сборочных единиц для оборудования по производству нанопродуктов.

Материал книги будет способствовать привлечению в сферу создания промышленных нанотехнологий и наноиндустрии специалистов в области инноватики, организующих реализацию инновационных проектов и привлекающих к ним специалистов физики и химии, инженеров-конструкторов, инженеров-технологов, работающих на предприятиях – реальных потребителях нанопродуктов.

Мы рассчитываем на то, что данное учебное пособие, изложенное максимально доступным языком, будет полезно для молодых учёных, аспирантов и студентов, от которых во многом зависит будущее нанотехнологического вектора развития экономики нашей страны.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Головин, Ю.И. Введение в нанотехнологию / Ю.И. Головин. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 112 с.
2. Золотухин, И.В. Новые направления материаловедения : учеб. пособие / И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин, О.В. Стогней. – Воронеж : ВГУ, 2000. – 360 с.
3. Фуллерены / Л.Н. Сидоров и др. – М. : Экзамен, 2005. – 688 с.
4. Харрис, П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века / П. Харрис. – М. : Техносфера, 2003. – 336 с.
5. Раков, Э.Г. Нанотрубки и фуллерены : учеб. пособие / Э.Г. Раков. – М. : Логос, 2006. – 376 с.
6. Углеродные наноматериалы «Таунит»: исследование, производство, применение / А.Г. Ткачев и др. // Нанотехника. – 2006. – № 2. – С. 17 – 21.

7. Мищенко, С.В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С.В. Мищенко, А.Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
8. Промышленное производство наноструктурного материала «Таунит» / А.Г. Ткачев, С.В. Мищенко и др. // Наноиндустрия. – 2007. – № 2. – С. 28 – 32.
9. Пат. 2296827 РФ, D 01 F 9/127, D 01 F 9/133. Способ получения волокнистых углеродных структур каталитическим пиролизом / А.Г. Ткачев, С.В. Мищенко, В.Н. Артемов ; ООО «Нанотехцентр». – № 2005124577/04 ; заявл. 03.08.2005 ; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10.
10. Ткачев, А.Г. Типовые технологические процессы изготовления деталей машин / А.Г. Ткачев, И.Н. Шубин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, 2004. – 112 с.
11. Типовые процессы в машиностроении. Лабораторный практикум / Шубин И.Н. и др. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, 2007. – 84 с.
12. Ткачев, А.Г. Технология аппаратостроения / А.Г. Ткачев. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 188 с.
13. Ткачев, А.Г. Технология машиностроения / А.Г. Ткачев, И.Н. Шубин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 164 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНОИНДУСТРИИ .....	7
1.1. Углеродные нанотрубки и нановолокна .....	7
1.1.1. Строение фуллереноподобных наноструктур .....	7
1.1.2. Свойства углеродных наноматериалов .....	13
1.1.3. Способы получения УНМ .....	15
1.2. Аппаратура для получения углеродных наноматериалов .....	22
1.2.1. Аппараты для газофазного химического осаждения .....	22
1.2.2. Реакторы с виброоживленным слоем катализатора ... ..	26
1.2.3. Аппараты для дугового синтеза УНМ .....	28
1.3. Технологическая схема и аппаратура опытно-промыш-ленного производства УНМ «Таунит» .....	29
1.3.1. Технологическая схема синтеза УНМ методом газо-фазного химического осаждения (ГФХО) .....	30
1.3.2. Ёмкостной реактор синтеза УНМ с неподвижным слоем катализатора .....	34
2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ НАНОИНДУСТРИИ .....	43
2.1. Общая характеристика аппаратостроения как основы наноиндустрии .....	43
2.1.1. Заготовки деталей оборудования наноиндустрии ....	45
2.1.2. Припуски и операционные допуски на обработку заготовок из проката .....	47
2.2. Заготовительные операции .....	50
2.2.1. Правка .....	50
2.2.2. Очистка .....	52
2.2.3. Разметка и раскрой .....	56
2.2.4. Резка заготовок .....	59
2.2.5. Обработка кромок .....	68
2.2.6. Гибка цилиндрических обечаек .....	72
2.2.7. Гибка конических обечаек .....	76
2.2.8. Гибка труб трубных заготовок .....	79
2.2.9. Сборка элементов конструкций аппаратов .....	89
2.3. Особенности технологии изготовления отдельных деталей аппаратов .....	94
2.3.1. Виды обечаек .....	94
2.3.2. Зигование .....	95
2.3.3. Разбортовка торцов .....	96
2.3.4. Отбортовка торцов .....	96
2.3.5. Шлифование .....	99
2.3.6. Особенности изготовления негабаритных и нежёстких обечаек .....	100
2.4. Корпуса (толстостенные обечайки) .....	102
2.5. Конструкции днищ .....	105
2.5.1. Метод штамповки на прессах .....	107
2.5.2. Метод ротационного выдавливания (спинингование) .....	108
2.5.3. Особенности изготовления тонкостенных днищ .....	112
2.5.4. Калибровка днищ .....	114
2.6. Трубные решётки .....	117

2.7. Сборка теплообменных аппаратов .....	120
2.7.1. Способы крепления труб в трубной решётке .....	122
2.7.2. Обварка труб в трубных решётках .....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	128
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	129