МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ



Р. С. Малсугенов

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Учебно-методическое пособие
для аспирантов обучающихся по направлению подготовки
2.5.7 Технологии и машины обработки давлением

Черкесск
2026

УДК 34.62
ББК 621.7
М 18

Рассмотрено на заседании кафедры «Мехатронные и робототехнические системы».
Протокол № 1 от «05» 09. 2025 г.
Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом СКГА.
Протокол № 28 от «28» 09. 2025 г.

Рецензенты: Бисилов Н. У. – к.т.н., доцент кафедры «МиРС»

М 18 **Малсугенов, Р. С.** Технологии и машины обработки давлением: учебно-методическое пособие для аспирантов обучающихся по направлению подготовки 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением / Р. С. Малсугенов. – Черкесск: БИЦ СКГА, 2026. – 52 с.

Данное учебно-методическое пособие разработано согласно учебному плану образовательной программы аспирантов по направлению подготовки 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением. Оно предназначено для обеспечения учебных занятий по курсу «Технологии и машины обработки давлением». В нём представлены основные методы обработки давлением и виды оборудования для их осуществления.

УДК 34.62
ББК 621.7

© Малсугенов Р. С., 2026
© ФГБОУ ВО СКГА, 2026

Оглавление

Введение 4
1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ 5
1.1. Прокатка 5
1.3. Прессование 9
1.5. Штамповка 11
2. ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА 14
3. ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ ЭЛАСТИЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ 16
4. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫХ МАШИН 19
4.1. Классификация кузнечных машин 19
4.3. Главные параметры и критерии сравнения кузнечно-штамповочных машин 22
5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫЕ МАШИНЫ 25
5.1. Принцип действия, классификация 25
ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЛИСТОШТАМПОВОЧНЫЕ ПРЕССЫ 29
6.1. Классификация и основные параметры 29
6.2. Конструктивные схемы и конструкции 30
7. КРИВОШИПНЫЕ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫЕ МАШИНЫ 32
7.2. Приближенные характеристики кинематических параметров 36
7.2 Деформирующая сила и энергия деформирования 37
8. ШТАМПОВОЧНЫЕ И КОВОЧНЫЕ МОЛОТЫ 39
8.1. Принципы действия и классификация молотов 39
8.2. Паровоздушные молоты 42
9. ДВУХКАМЕРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГАЗОВОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ 44
Список использованной литературы 51

Введение

Технологии обработки металлов давлением являются основой машиностроительных производств. Они обеспечивают производство металлических заготовок различной формы: прутки, и заготовки круглого, квадратного, шестигранного сечений, рельсы, уголки, швеллеры другие профилированные заготовки, а также производство труб, проволоки, плоских профилированных и многослойных листов. Кроме того, используя технологии обработки давлением, производят готовые изделия. В частности от 40 до 80% деталей изготавливаемых из листового материала, производится штамповкой [1]. Наряду с этим технологии обработки давлением позволяют повысить механические характеристики обрабатываемых заготовок.

К технологиям обработки давлением относится прокатка, волочение, прессование, ковка, объемная и листовая штамповка [2,3]. Для их осуществления применяются различные виды оборудования: гидравлические прессы, кривошипные прессы, винтовые прессы, ротационные машины, молоты, импульсные машины [4].

Курс «Технологии и машины обработки давлением» является базовой дисциплиной образовательной программы аспирантов по направлению подготовки 2.5.7 Технологии и машины обработки металлов давлением. Целью этого курса является формирование у аспирантов знаний, умений и навыков, обеспечивающих разработку новых технологических процессов обработки давлением и оборудование для их осуществления. Данное учебное пособие предназначено для обеспечения практических занятий по курсу «Технологии и машины обработки давлением». При его составлении основное внимание уделено изучению основных методов обработки металлов давлением и оборудование для их реализации.

1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ
1.1. Прокатка

Прокатка относится к основным процессам обработки металлов давлением и применяется для производства листов, различных профилей и труб. При горячей обработке металлов давлением различают следующие виды прокатки: продольную, поперечную, поперечно-винтовую и периодическую, которые отличаются взаимным расположением осей валков и обрабатываемого тела, различным направлением векторов скоростей вращения валков и течения деформируемого металла [2]. Прокатка представляет собой процесс деформирования продолговатой металлической заготовки или слитка между двумя вращающимися валками, расстояние между рабочими поверхностями которых меньше высоты заготовки.

На рисунке 1.1 представлена схема продольной прокатки [3]. Заготовка подается к двум вращающимся в разные стороны валкам. Оси валков параллельны. В точках соприкосновения заготовки с валками возникают нормальная сила N, направленная по радиусу, и сила трения T, направленная по касательной к окружности. На рисунке 1.1 показаны проекции этих сил на оси z и y. Заготовка втягивается в зазор между вращающимися валками под действием сил трения.

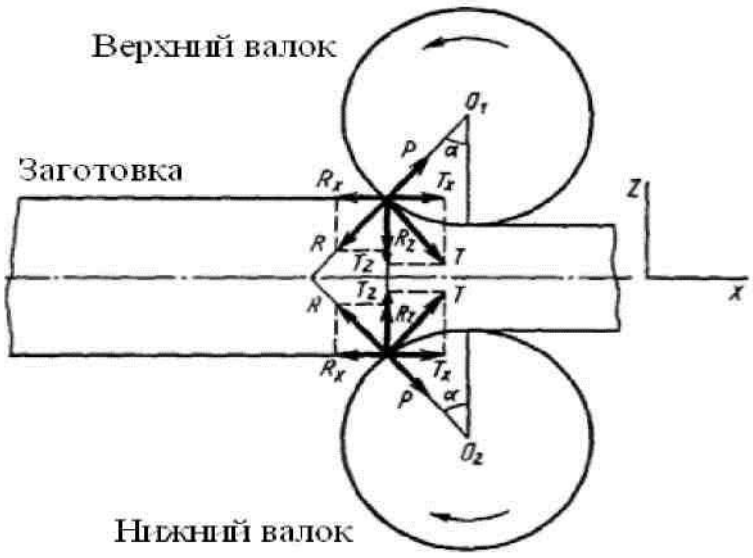


Рисунок.1 1. – Схема продольной прокатки с указанием действующих сил

Прокатка металлов осуществляется на прокатных станах. Основными рабочими элементами прокатных станов являются валки, имеющие цилиндрическую форму [3]. Валки размещаются в основной части прокатного стана – рабочей клети. Рабочая часть валка называется бочкой. Бочки могут быть гладкими или ручьевыми. Первые применяются для прокатки листов и лент, а вторые – для сортового металла. Ручьи представляют собой кольцевые вырезы на поверхности валка. Совпадающие ручьи верхнего и

нижнего валков образуют калибры, с помощью которых сортовому прокату постепенно придаются требуемые профили.

Прокатные станы классифицируются по ряду признаков, основным из которых является род выпускаемой продукции. В связи с этим можно выделить следующие наиболее распространенные виды станов: сортопрокатные для выпуска сортового проката; листовые и полосовые станы горячей прокатки; трубопрокатные станы; станы холодной прокатки стали и цветных металлов (тонколистовые, ленточные, фольгопрокатные и т.д.); деталепрокатные станы для выпуска специального или периодического проката.

Горячая прокатка стали. На обжимных станах с диаметром валков D=800...1500 мм (блюмингах и слябингах) обжимают слитки массой до 35 т и более. Заготовочные станы (D=450...750 мм) предназначены для прокатки блюмсов на заготовки сечением 40х40... 150х150 мм. На рельсобалочных станах (D=750...950 мм) осуществляют горячую прокатку рельсов, балок, крупных уголков и других тяжелых профилей.

На крупносортных станах (D=500...800 мм) прокатывают круглые и квадратные профили, балки и швеллеры. Среднесортные профили - квадрат и круг, балки и швеллеры – прокатывают на непрерывных и линейных станах (D=300...500 мм), состоящих из нескольких клетей дуо. Мелкосортный профиль - круг, квадрат, катанка, уголок – производят на полунепрерывных и непрерывных станах (D=250...300 мм). На непрерывных станах скорость прокатки достигает 40 м/с и более.

Для горячей прокатки листов из стали в основном используются непрерывные или полунепрерывные толстолистовые и листовые широкополосные станы, а также широкополосные станы с моталками в печах. Применяются одно-, двух- и много-клетьевые дуо-, трио-, квартостаны, а также универсальные станы.

Холодная прокатка стали. На непрерывных квартостанах и на реверсивных одноклетьевых станах прокатывают листы и ленту для автомобильной и электротехнической промышленности, кровельное железо и другие виды продукции: тонкий (толщиной менее 0,5 мм) и очень тонкие (толщиной менее 0,1 мм) полосы и ленты изготовляют на многовалковых станах. Жесть катают, как правило, в пятиклетьевых непрерывных квартостанах. Полученную черную жесть с целью защиты от коррозии подвергают цинкованию, лужению, плакированию (покрытию пластмассами) и другим видам обработки.

Производство специальных видов проката. Все большее распространение в промышленности получают гнутые профили, применение которых вместо сварных конструкций в строительстве позволяет экономить до 30% металла.

Гнутые профили изготовляют непрерывном способом на много-клетьевых роли-ко-гибочных станах из стального листа, уголков, швеллеров и другого проката. Сложная форма гнутых профилей не позволяет получать их обычными методами прокатки.

Периодический прокат – полосы переменного сечения по длине, заготовки для штамповки деталей с местным утолщением, лопатки, трубы, оси вагонов, шары и др. – получают на станах поперечной прокатки. Его применение дает экономию до 30% металла по сравнению с производством вышеназванных изделий из обычного проката.

Прокатка цветных металлов и сплавов. Слитки прямоугольной формы используют для получения полосового и листового проката (из круглых слитков производят проволоку, прутки, трубы). Перед прокаткой поверхностные дефекты слитков удаляют строганием или фрезерованием.

Алюминиевые, медные и никелевые сплавы хорошо прокатываются в холодном и горячем состояниях. Слитки прокатываются в горячем состоянии на прутки или листы. Горячекатаные листы подвергают холодной прокатке, которую ведут с промежуточными отжигами.

На рисунке 1.2 представлена схема поперечной прокатки [2]. Процесс поперечной прокатки осуществляют на двух или трех вращающихся в одну сторону валках. Заготовка в виде прутка или трубы круглого сечения в процессе прокатки вращается в другую сторону. Оси валков и заготовки параллельны, в процессе прокатки обычно сближаются. Горячей поперечной прокаткой, в частности, получают заготовки цилиндрических шестерен с зубьями (модуль 7... 15 мм), а также бочкообразные ролики подшипников и другие детали с заданным внешним и внутренним профилем.

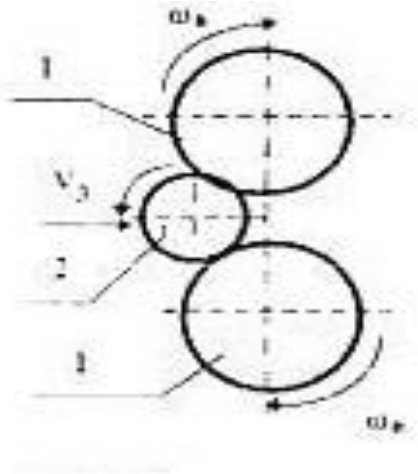


Рисунок.1.2 – Схема поперечной прокатки.

Поперечно-клиновую прокатку осуществляют двумя валками с клиновыми ручьями (рисунок 1.3). Оси валков и заготовки параллельны. Валки вращаются в одну сторону, а заготовка – в другую. Заготовка, кроме вращательного, получает поступательное движение. Ручьи обычно вытачивают не на валке, а на сменных сегментах, укрепленных на валках. Поперечно-клиновой прокаткой получают специальный прокат: заготовки ступенчатых валков, крупных шаровых пяльцев и других деталей переменного по длине сечения

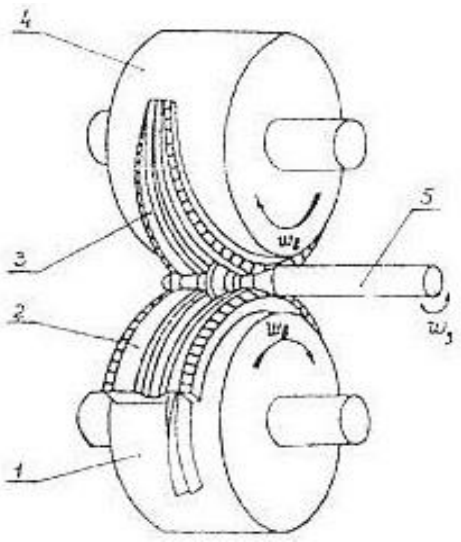


Рисунок.1.3 – Поперечно-клиновая прокатка

1.2. Волочение

Волочение – процесс обработки металла давлением, при котором материал протягивается через отверстие инструмента – волоку (фильеру), площадь выходного сечения которой меньше площади сечения заготовки. В результате поперечные размеры изделий уменьшаются, а длина увеличивается. Волочение производят через одну или несколько волок при обжатии за один проход на 16...30%. Суммарное обжатие заготовки может достигать 40...85%. Схемы процесса волочения представлены на рисунке 1.4.

Волочильные станы состоят из волоки и тянущих устройств, последние могут иметь прямолинейное (цепные, реечные, винтовые, канатные, гидравлические) и круговое движение (барабанные). На станах с прямолинейным движением тянущих устройств изготовляют прутки, профили, трубы; на барабанных станах – проволоку и трубы малого диаметра.

Прямолинейные станы могут быть одно- и многопоточные (до 5 изделий одновременно). На барабанных станах осуществляется процесс как однократного, так и многократного волочения. Станы для многократного волочения имеют от 6 до 20-30 волок и предназначены для получения тонких и ультратонких (до 8...15 мкм) профилей.

Профиль продукции обеспечивается формой волоки, изготовляемой из инструментальных сталей У8-У12, 12М, твердых сплавов ВК2, ВК3, а для получения тонкой проволоки (менее 0,3 мм) – из алмаза. Изделия имеют высокую точность размеров (например, при волочении ультратонкой проволоки допуск составляет ±0,001 мм).

Волочение осуществляется в холодном и горячем состояниях с обильным применением смазки. Изделия из алюминия, меди, никеля и их сплавов, стали волочат при комнатной температуре с промежуточными отжигами для снятия наклепа. Хрупкие металлы (молибден, вольфрам и др.) обрабатывают в горячем состоянии в защитной атмосфере или вакууме.

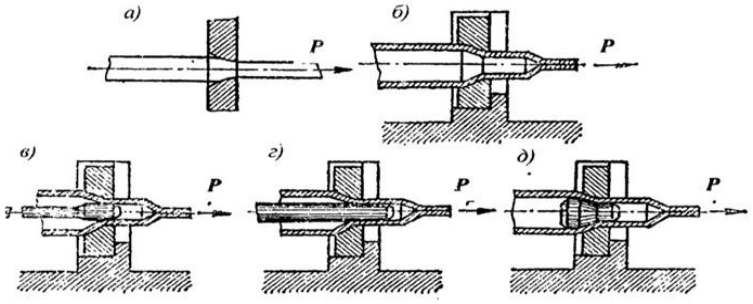


Рисунок 1.4 – Способы волочения труб

В последние годы промышленное применение нашло волочение (например, тонкостенных труб из сталей и цветных металлов) с применением ультразвука. При этом на 25...35% снижается усиление волочения, улучшается качество поверхности изделий.

1.3. Прессование

Прессование – технологический процесс обработки давлением, заключающийся в выдавливании металла пуансоном из закрытого контейнера через отверстие в матрице (рисунок 1.5). Профиль изделия определяется профилем отверстия в матрице. Обычно прессованием изготовляют прутки диаметром 5...300 мм, трубы с внутренним диаметром 18...700 мм и толщиной стенки 1,25...50 мм [3] . Этим способом получают изделия сложной формы, которые нельзя изготовить никакими другими методами ОМД.

Продукция отличается высокой точностью размеров. Мягкая схема напряженного состояния позволяет деформировать на 85...90% даже самые малопластичные и трудно-формируемые металлы и сплавы. При прессовании пластичных металлов может быть достигнут эффект сверхпластичности (при прессовании чистого алюминия вытяжка может достигать 1000%). Прессованием получают изделия из алюминия, титана, магния, цинка и их сплавов, углеродистых и легированных сталей.

При прессовании труб к торцу пресс – шайбы крепится стальная игла. Металл выдавливается в кольцевой зазор между отверстием матрицы и

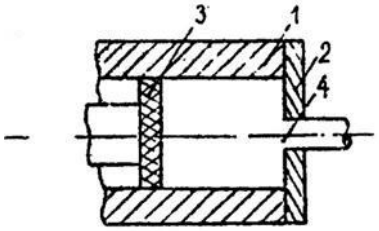


Рисунок 1.5
1 – контейнер; 2 – матрица; 3 – пуансон; 4 – изделие

иглой. Матрицы изготовляют из легированных сталей (3 2В8, 38ХМЮА и др.) и твердых сплавов. Прессование ведут на гидравлических прессах, развивающих усилие 15000...300000 МН.

Среди высокопроизводительных методов прессования следует отметить гидропрессование (гидроэкструзия) жидкостью высокого давления (до 3000 МПа) и прессование с использованием энергии взрыва. В первом случае жидкостное трение на контакте заготовка-матрица устраняет серьезный недостаток обычного прессования – трение металла о стенки контейнера и матрицы. В результате скорость выдавливания возрастает, изделия получают равномерные свойства по длине, практически полированную поверхность. Повышается износостойкость инструмента, а усилие уменьшается на 30...40%, уменьшается неоднородность деформации, что позволяет обрабатывать хрупкие материалы (сплавы вольфрама, бериллия, ниобия и др.). Гидропрессование проводят при комнатной температуре. При повышенных температурах жидкость заменяют газом высокого давления.

1.4. Ковка

Ковкой называется один из способов ОМД при котором инструмент оказывает многократное прерывистое воздействие на нагретую заготовку, в результате чего она, деформируясь, приобретает заданную форму и размеры [2]. Различают ковку в штампах (штамповка) и без применения штампов (так называемую свободную ковку). При свободной ковке перемещение деформированного металла не встречает сопротивления своему движению со стороны инструмента. Исходным материалом для ковки деталей служат слитки и различный прокат.

Ковка подразделяется на ручную и машинную. Ручную ковку осуществляют молотом на наковальне и применяют для индивидуального изготовления мелких изделий или при ремонтных работах. Механическую ковку производят на ковочных молотах и прессах.

Молоты используют для изготовления изделий средних размеров, прессы – для изготовления крупных изделий. Все типы молотов и прессов имеют подвижные (баба и верхний боек) и неподвижные (шабот и нижний боек) части.

При всех операциях свободной ковки обработка ведется последовательными ударами молотов, но высокоскоростные молоты, рассчитаны на одноударное действие. Наибольшее распространение получили паровоздушные, пневматические, механические молоты и гидравлические прессы.

При свободной ковке используют разнообразный кузнечный инструмент. Технологические процессы свободной ковки представляют собой различное сочетание основных операций: осадка, высадка, протяжка, обкатка, раскатка, прошивка и т.д.

1.5. Штамповка

Штамповка представляет собой процесс формообразования изделий, осуществляемый в штампах. Метод экономичен и широко применяется в различных отраслях промышленности. Штамповку осуществляют на прессах и молотах,

Горячая объемная штамповка применяется в основном для массового и серийного производства поковок и позволяет получать изделия с высокой точностью формы и размеров. Технологический процесс этого вида штамповки состоит из следующих операций: разрезка металла на заготовки, нагрев заготовок, штамповка, термообработка, отделка поковок. Листовой штамповкой (Рисунок 1.6) изготавливают плоские или пространственные тонкостенные изделия из стали, цветных металлов и сплавов. При холодной штамповке используют листовые заготовки толщиной от сотых долей миллиметра до 4 мм, при горячей – толщиной более 4 мм. Продукция листовой штамповки отличается высокой точностью и не нуждается в последующей обработке на металлорежущих станках. Сортамент изделий весьма разнообразен: от деталей часов до днищ паровых котлов и резервуаров. Этим методом получают более 70% деталей легковых автомобилей.

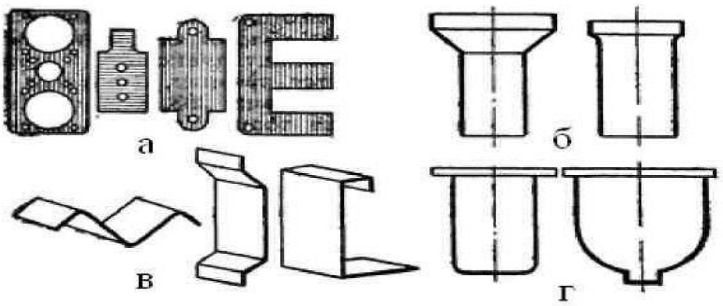


Рисунок 1.6. – Детали, получаемые листовой штамповкой

Все операции листовой штамповки можно классифицировать на *разделительные* (отделение одной части заготовок от другой) и *формоизменяющие* (получение изделий сложной формы перемещением элементарных объемов материала исходной заготовки без ее разрушения) [1, 8]. К основным разделительным операциям относятся (Рисунок 1.7): *резка* – последовательное отделение части металла по прямой или кривой линии; *вырубка* – единовременное отделение материала от заготовки по замкнутому контуру, причем отделяемая часть является изделием; *пробивка* - получение отверстий отделением материала по замкнутому контуру внутри детали.

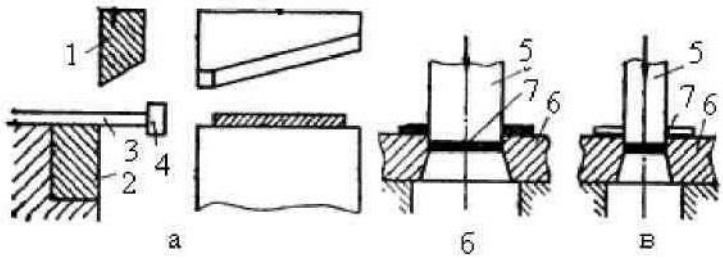


Рисунок 1.7 – Разделительные операции листовой штамповки:
а – резка, б – вырубка, в – пробивка; 1 – верхний нож; 2 – нижний нож; 3 – разрезаемый лист; 4 – упор; 5 – пуансон; 6 – матрица; 7 – изделие или полуфабрикат

К основным формоизменяющим операциям относятся правка, гибка, вытяжка, протяжка, отбортовка и формовка (рисунок 1.8).

Правка (рисунок 1.8, а) применяется для устранения неровностей и искривлений плоских деталей после вырубки, пробивки, гибки или других формоизменяющих операций.

Гибка бывает одноугловая (V-образная) и двухугловая – U-образная (рисунок 1.8, б, в, *Вытяжка* – операция, превращающая плоскую заготовку в полую деталь.

Протяжка – вытяжка с утонением. Эта операция применяется для изготовления полых тонкостенных деталей (рисунок 1.8, *д).*

Отбортовка и разбортовка – операции, соответственно, для образования борта по наружному контуру заготовки или по контуру ранее выполненного отверстия (рисунок 1.8, з).

Формовка – изменение формы заготовки или полуфабриката посредством местных деформаций.

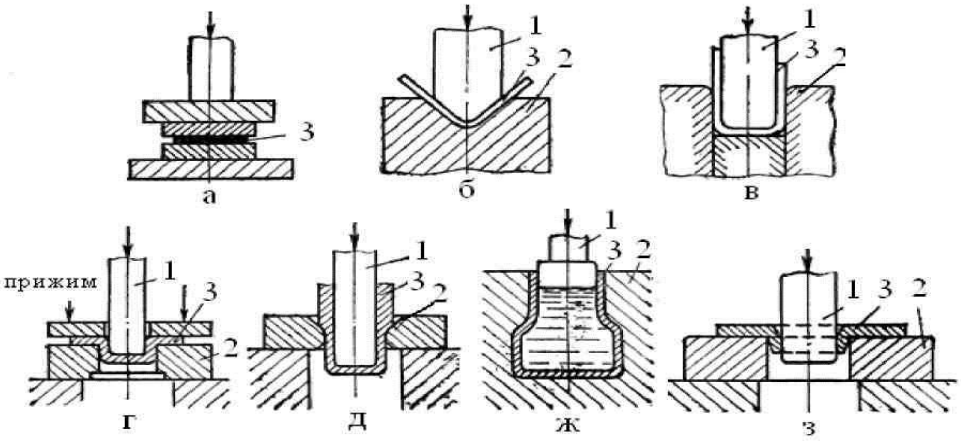


Рисунок 1.8. – Формоизменяющие операции листовой штамповки
1 – пуансоны; 2 – матрицы; 3 – изделия или полуфабрикаты

Контрольные вопросы

1. Виды обработки металлов давлением?
2. Преимущества обработки металлов давлением по сравнению с другими методами обработки?
3. За счет чего повышается прочность металла при обработки давлением?
4. Технологический процесс прокатки металлов.
5. Оборудование для прокатки металлов.
6. Основные виды сортового стального проката.
7. Прокатка цветных металлов и сплавов.
8. Технологический процесс волочения.
9. Сущность процесса ковки?
10. Объемная и листовая штамповка.
11. Разделительные операции листовой штамповки.
12. Формоизменяющие операции листовой штамповки

2. ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА

Объемной штамповкой называется процесс деформирования заготовки с помощью специального инструмента – штампа. Течение металла ограничивается поверхностями полостей, изготовленных в отдельных частях штампа, которые образуют единую замкнутую полость (ручей), соответствующую конфигурации штампуемого изделия.

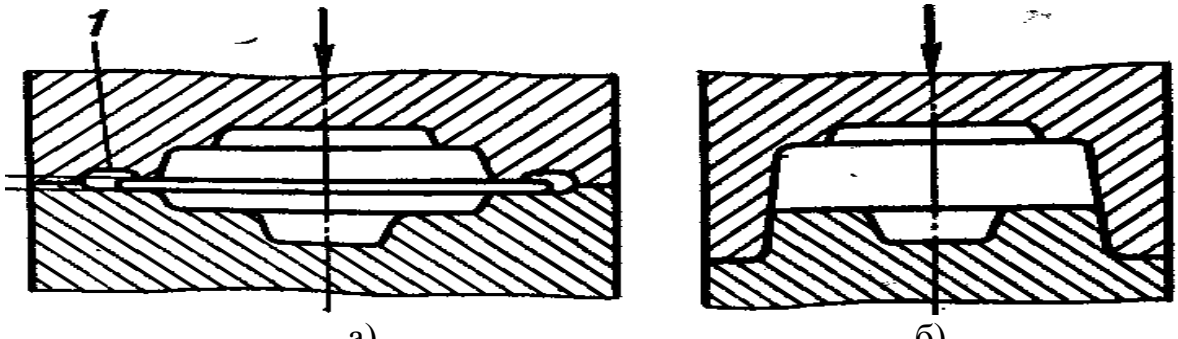
По сравнению с ковкой штамповка имеет ряд преимуществ. Объемной штамповкой можно получать поковки сложной конфигурации без напусков, что при ковке невозможно. Производительность штамповки значительно выше – десятки и сотни поковок в час.

В то же время штамп – дорогостоящий инструмент и пригоден только для изготовления конкретно одного изделия. В связи с этим штамповка экономически целесообразна лишь при изготовлении больших партий какого-то изделия.

В зависимости от типа штампа выделяют штамповку в открытых и закрытых штампах [3,6]. Штамповка в открытых штампах (рисунок 2.1, а) характеризуется переменным зазором между подвижной и неподвижной частями штампа. В этот зазор вытекает заусенец 1 (облой), который закрывает выход из полости штампа и заставляет металл целиком заполнить всю полость. В конечный момент деформирования в заусенец выжимаются излишки металла, находящиеся в полости, что позволяет не предъявлять особо высоких требований к точности заготовок по массе.

Штамповка в закрытых штампах (рисунок 2.1, б) характеризуется тем, что полость штампа в процессе деформирования остается закрытой. Зазор между подвижной и неподвижной частями штампа при этом постоянный и небольшой, так что образование заусенца в нем не предусмотрено.

При штамповке в закрытых штампах необходимо строго соблюдать равенство объемов заготовки и поковки, иначе при недостатке металла не заполнятся углы полости штампа, а при избытке размер поковки по высоте будет больше требуемого. Существенное преимущество штамповки в



а) б)

Рисунок 2.1 – Схема штамповки: а – в открытом штампе; б – в закрытом штампе

закрытых штампах – уменьшение расхода металла, поскольку нет отхода в заусенец. Поковки, полученные в закрытых штампах, имеют более благоприятную макроструктуру, так как волокна обтекают контур поковки, а не перерезаются в месте выхода металла в заусенец.

Возможности штамповки в безоблойном штампе ограничены поковками типа тел вращения (диски, кольца, шестерни, и т.д.) с отношением наружного диаметра к высоте поковки не менее 2:1, т.е. относительно низкими поковками. Плоскость разъема закрытого штампа устанавливается не посередине высоты, а у верхней или нижней кромки наибольшего диаметра поковки.

В открытых штампах можно штамповать как осесимметричные, так и несимметричные поковки сложной формы. Плоскость разъема таких штампов обычно проходит по оси детали и соответствует плоскости наибольшего габаритного размера, что обеспечивает легкость ее удаления из штампа и минимальные напуски на штамповочные уклоны.

Контрольные вопросы

1. Каково влияние обработки давлением на структуру и свойства металла?
2. Перечислите критерии, согласно которым выбирают штамповку в открытом или закрытом штампе.
3. Каким образом определяется размер исходной заготовки?
4. Что называют облоем?
5. По каким причинам масса штампованных поковок не превышает в основном 400 кг?
6. Перечислить преимущества и недостатки объемной штамповки в сравнении с ковкой.

3. ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ ЭЛАСТИЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Использование традиционных методов листовой штамповки связано с изготовлением дорогой штамповочной оснастки и эффективно лишь при крупносерийном и массовом характере производства. В мелкосерийном и опытном производствах холодная листовая штамповка в случае применения обычных конструкций штампов экономически невыгодна, то есть затраты на штамповочную оснастку не окупаются.

Одним из экономически эффективных методов штамповки в условиях мелкосерийного и опытного производства является штамповка эластичным инструментом, когда один из рабочих инструментов изготовлен из резины или полиуретана [1]. При этом значительно упрощается конструкция инструмента и удешевляется его изготовление, отпадает необходимость изготовления и пригонки второго рабочего инструмента, сокращаются сроки подготовки производства.

Штамповка эластичным инструментом применяется как для разделительных операций – вырубки-пробивки, так и для формоизменяющих операций – гибки, вытяжки и формовки. В качестве эластичных сред для штамповки используются резины и полиуретаны. Резины менее износостойки и работают при сравнительно небольших давлениях, обычно не превышающих 20-30 МПа.

Типовая универсальная оснастка для вырубки-пробивки показана на Рисунок. 3.1. За один ход пресса производится вырубка детали по контуру и пробивка отверстий и пазов в соответствии с конфигурацией вырезного шаблона. Контейнер, в котором располагается эластичный инструмент, обычно изготавливают из стали 40Х с твердостью после нормализации *HRC* 28-32.

Большое значение при вырезке деталей имеет высота вырезного шаблона, от которого зависит величина отхода материала и качество детали. Оптимальную высоту шаблона H (в мм), обеспечивающую качественную вырезку заготовки из пластичного материала, можно определить по формуле

$$H = 3\left(1+\delta_{\text{р}}\right)\sqrt{s}, \qquad (3.1)$$

где $\delta_{\text{р}}$ – относительное удлинение материала; s – толщина материала, мм.

Высота эластичного блока $H_{\text{э}}$ (мм) выбирается из условия

$$H_{\text{э}} \geq 3H + 10, \qquad (3.2)$$

где H берется в миллиметрах.

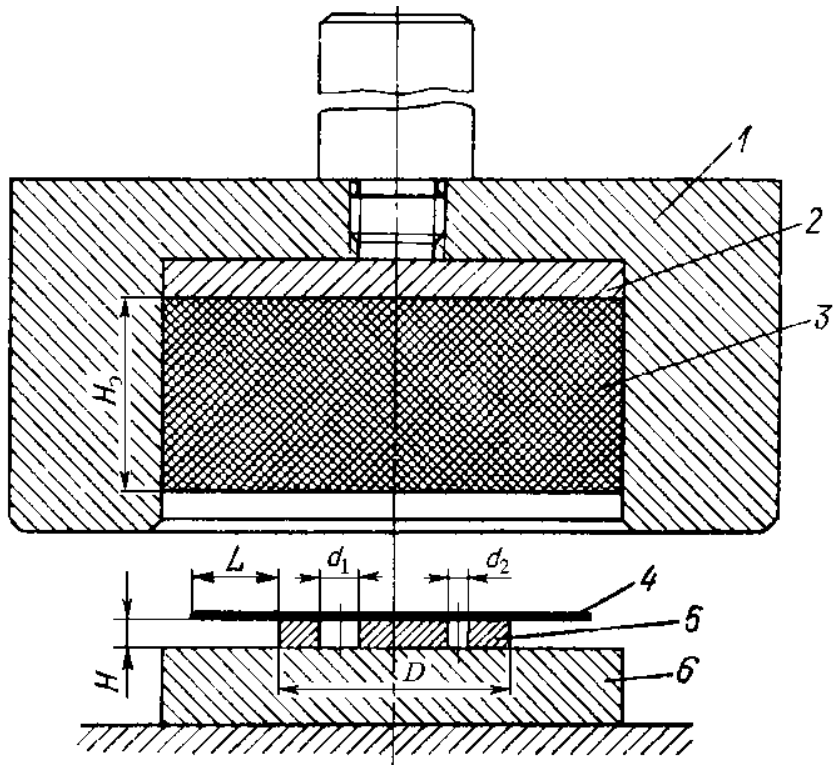


Рисунок 3.1 – Штамп для вырубки-пробивки эластичным инструментом:
1 – контейнер; 2 – шайба; 3 – эластичный инструмент; 4 – заготовка; 5 – вырезной шаблон; 6 – подштамповая плита

Необходимый припуск материала L (мм) при вырубке деталей с простым контуром определяется по формуле

$$L = 1,4H + \frac{(H+s)}{f}, \tag{3.3}$$

где f – коэффициент трения между заготовкой и подштамповой плитой.

При вырубке деталей с криволинейным контуром величина припуска L (мм) определяется:

$$L = 1,4H + \frac{H(2R \pm H)}{2f(R \pm H)}, \tag{3.4}$$

где R – где радиус кривизны контура детали (знак «плюс» берется для выпуклого контура, «минус» – для вогнутого).

Давление, необходимое для вырубки детали по контуру, зависит от механических свойств материала, его толщины и высоты вырезного шаблона. Для выпуклого (знак «плюс») или вогнутого (знак «минус») криволинейного участка давление вырезки q определяется по формуле

$$q = \frac{2Rs\sigma_в}{H(2R \pm H)}, \tag{3.5}$$

а для прямолинейного участка по формуле

$$q = s\sigma_в/H. \quad (3.6)$$

Для пробивки отверстий небольшого диаметра d давление составляет:

$$q = 3s\sigma_в/d, \quad (3.7)$$

а для вырезки небольших пазов с размерами $a \times b$

$$q = \frac{2s(a+b)\sigma_в}{ab}. \quad (3.8)$$

При одновременной вырубке детали по контуру и пробивке отверстий и пазов необходимое давление следует определять по максимальной величине q_{max}, которое, как правило, соответствует пробивке отверстий и пазов с наименьшей площадью.

Усилие пресса P, необходимое для осуществления разделительной операции, определяется с учетом коэффициента потерь на трение и сжатие эластичного инструмента по формуле

$$P = 1{,}2Fq_{max}, \quad (3.9)$$

где F – площадь рабочей поверхности эластичного инструмента.

Контрольные вопросы

1. Назовите преимущества разделения материала эластичным инструментом перед традиционной вырубкой-пробивкой жестким инструментом.
2. Какие материалы используются для изготовления эластичного инструмента?
3. Как определяют усилие вырубки-пробивки эластичной средой?
4. От чего зависит величина припуска для вырубки?

4. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫХ МАШИН

4.1. Классификация кузнечных машин

Кузнечно-штамповочные машины относятся к технологическим машинам для формоизменения под давлением металлов и неметаллических материалов в холодном, полугорячем и горячем состоянии. Характер изменения скорости рабочего звена (ползуна), исполнительного механизма в процессе деформирования металла (рабочего хода) служит первым научно обоснованным признаком, установленным проф. А. И. Зиминым [4]. Согласно этому признаку современные КШМ в иерархической классификации подразделяют на восемь классов в порядке возрастания максимального значения скорости рабочего звена (рисунок 4.1).

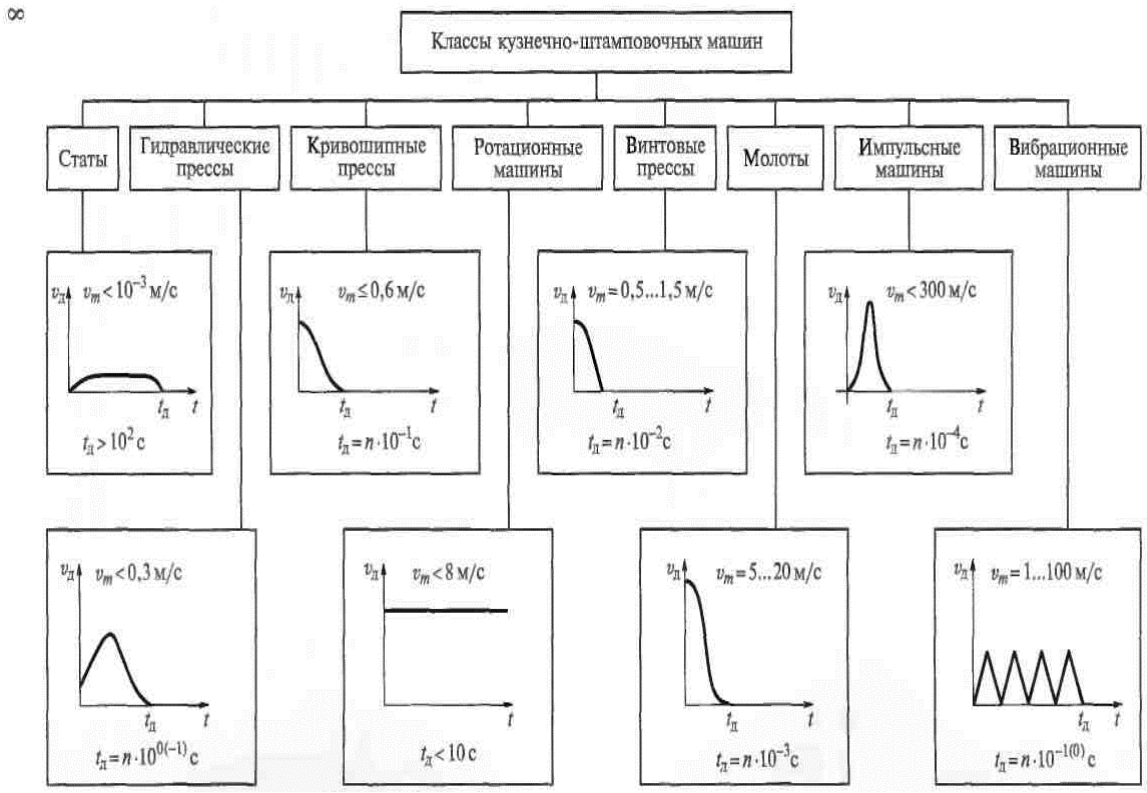


Рисунок 4.2 – Классификация кузнечно-штамповочных машин
υ_2, t_2 – скорость и время деформирования; υ_m – максимальная скорость деформирования

Для прессов с насосно-аккумуляторным приводом скорость зависит от разности номинальной силы пресса F_H и деформирующей силы $F_Д$ при коэффициенте пропорциональности φ:

$$\upsilon_д \approx \varphi\sqrt{F_н - F_д}. \qquad (4.1)$$

Скорость ползуна *кривошипного (механического) пресса* переменная, зависит от закона движения кривошипно-шатунного механизма:

$$v_д = \frac{2\pi n}{60} R(1 + \lambda \cos\alpha)\sin\alpha \approx \frac{\pi n}{30} R \sin\alpha, \quad (4.2)$$

где n – частота вращения кривошипного вала, мин$^{-1}$; R – радиус кривошипа; α- угол поворота кривошипа, отсчитываемый от нижней мертвой точки; λ- отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

Скорость деформирования материала в *винтовых прессах* и *молотах* – машинах ударного действия зависит от мгновенного значения кинетической энергии рабочих частей T_i.

$$v_д = \sqrt{\frac{2T_i}{m}} \approx \sqrt{\frac{2(T_э - A_{дi})}{m}}, \quad (4.3)$$

где $T_э$ – эффективная энергия; $A_{дi}$, – текущее значение работы деформирования; m – масса рабочих частей (для винтового пресса – приведенная масса).

Скорость деформирования материала в *импульсных машинах* характеризуется кратковременностью достижения максимального значения, зависит от формы импульса, генерируемого источником: электромагнитным полем, электрическим разрядом, взрывчатым веществом, сжатой жидкостью.

В *вибрационных машинах* механические колебания (вибрации), воздействующие на металл (материал) во время деформирования, характеризуются амплитудой и частотой.

Приблизительный диапазон времени деформирования на импульсных машинах находится в пределах 10^{-4}... 10^{-3} с, на молотах – 10^{-3}... 10^{-2} с, на винтовых прессах – 10^{-2}... 10^{-1} с, на кривошипных прессах – 10^{-1}...5 • 10^{-1}, на гидравлических прессах - 5 •10^{-1}...5 с, на гидравлических и газовых статах – 10^{1}... 10^{2} с и более [7].

Сила, которую могут развить КШМ во время деформирования металла, называется деформирующей. Характер изменения деформирующей силы зависит от структуры главных рабочих механизмов. Кузнечно-штамповочные машины с кинематически свободным перемещением исполнительного звена (ползуна), например гидропрессы, могут развивать максимальную деформирующую силу на любом участке перемещения. Величина ее будет пропорциональна силе сопротивления деформированию материала заготовки. Кузнечно-штамповочные машины с кинематически ограниченным перемещением исполнительного звена (ползуна), например кривошипные прессы, по условиям прочности могут развивать максимальную деформирующую силу только на коротком участке в конце хода ползуна. Гидропрессы и кривошипные прессы относят к машинам с ограниченной прочностными критериями номинальной силой.

Машины ударного действия (винтовые прессы и молоты) характеризуются номинальной величиной эффективной кинетической энергии рабочих частей. Изменение эффективной энергии во время деформирования металла пропорционально квадрату мгновенного значения скорости ползуна. Деформирующую силу они создают в процессе

деформирования заготовки за счет перехода кинетической энергии в работу деформирования. Чем меньше деформация заготовки, тем больше сила. Эти машины относят к машинам с ограниченной энергией.

Конструкции машин зависят от принципов преобразования входной энергии (электрической, тепловой, химической) в энергию энергоносителя (сжатого воздуха, пара, сжатой жидкости, электромагнитного поля), затем в эффективную энергию машины и в работу пластического деформирования материала. В зависимости от вида эффективной энергии или сочетания видов КШМ подразделяются на введенные А. И. Зиминым *энерготипы,* использующие кинетическую энергию поступательного, вращательного движения, энергию давления, импульсную энергию и их сочетания (табл. 4.1) [7].

Таблица 4.1 – Энерготипы кузнечно штамповочных машин

Индекс энерготипа	Энерготип					
	1	2	3	4	5	6
I	$T_{эп}$ — энергия поступательного движения	$T_{эо}$ — энергия вращательного движения	$T_{эр}$ — энергия давления	$T_{эт}$ — импульсная энергия	—	—
II	$T_{эпо}$	$T_{эпр}$	$T_{эпт}$	$T_{эор}$	$T_{эот}$	$T_{эрт}$
III	$T_{эпор}$	$T_{эпот}$	$T_{эпрт}$	$T_{эорт}$	—	—
IV	$T_{эпорт}$	—	—	—	—	—

4.2. Принципиальные схемы и эффективная энергия машин

Гидравлические и *газовые статы* (рисунок 4.1, а*)* относятся к машинам квазистатического воздействия на материал, использующим энергию давления жидкости или газа [4]. Они содержат камеру, в которую загружен обрабатываемый материал и подается жидкость или нейтральный газ (азот, аргон) под давлением в несколько десятков килопаскалей. Скорость деформирования составляет сотые и десятые доли миллиметров в секунду. Материал подвергается всестороннему гидростатическому сжатию в течение необходимого времени, а затем камера разгружается по определенному закону. Энергия привода $A_п$ расходуется на упругую деформацию конструкции камеры $A_к$, сжатие жидкости $A_ж$ и деформирование материала $A_Д$.

Гидравлические прессы (рисунок 4.1, *б)* относят к машинам квазистатического (приблизительно статического) воздействия на материал [4]. Скорость деформирования составляет 5... 10 • 10^{-3} м/с для прессов с насосным приводом и до 0,3 м/с для прессов с насосно-аккумуляторным приводом. Для деформирования используется энергия давления рабочей

жидкости (минерального, синтетического масла или водной эмульсии) сжатой до давления p = 10...32 МПа и, в некоторых конструкциях

p = 120...300 МПа. Энергия давления рабочей жидкости расходуется на совершение работы привода

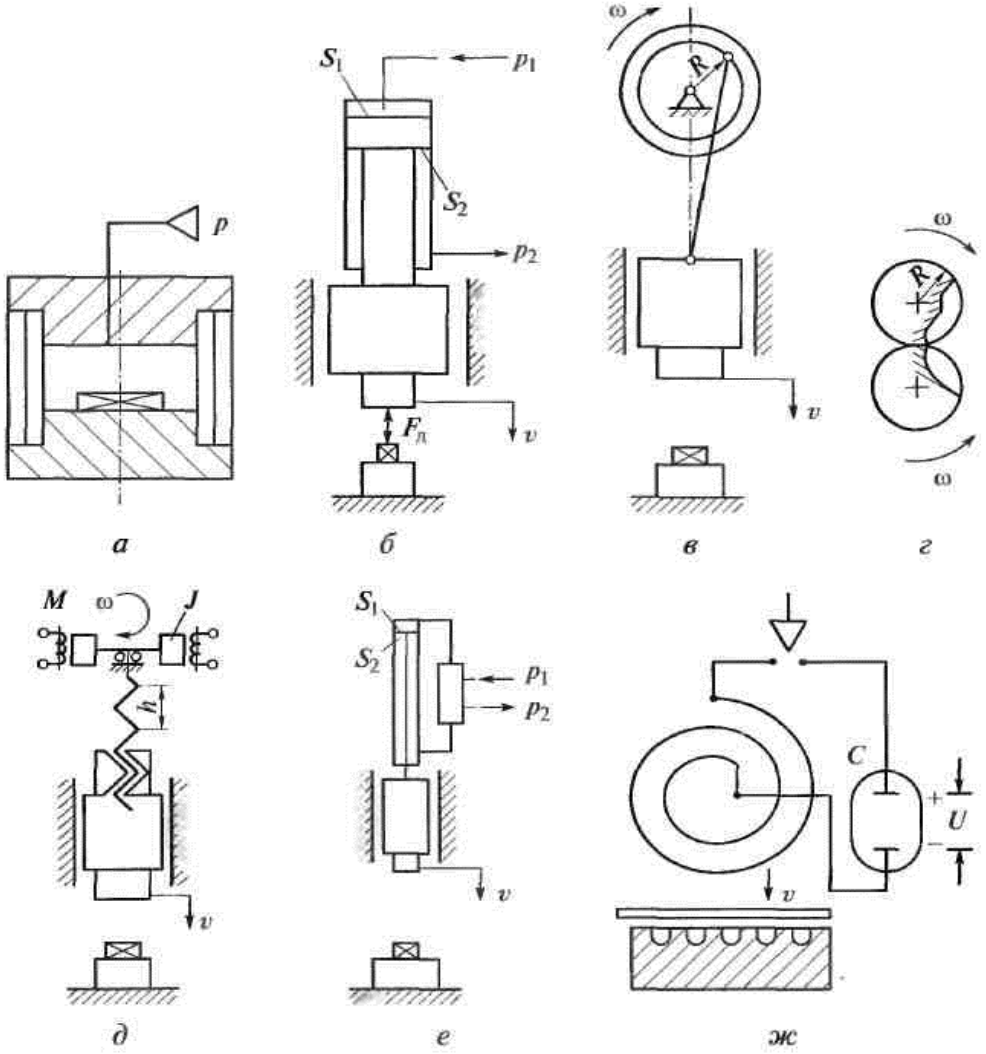


Рисунок. 4.1. – Принципиальные схемы кузнечно-штамповочных машин:
а – гидро- и газостатов; *б* – гидропрессов; *в* – кривошипных прессов;
г – ротационных машин; *д* – винтовых прессов; *е* – молотов; *ж* – импульсных машин

4.3. Главные параметры и критерии сравнения кузнечно-штамповочных машин

Кузнечно-штамповочные машины характеризуют размерными, линейными, скоростными, энергетическими и массовыми параметрами [4].

Главный размерный параметр – это исходная величина для конструкторского расчета, конструирования и последующего технологического выбора машины. Главными размерными параметрами для машин квазистатического действия является номинальная сила F_H, развиваемая при определенных условиях рабочим звеном главного

исполнительного механизма; для машин динамического (ударного) действия – кинетическая энергия $T_Э$, развиваемая подвижными частями машины к началу рабочего хода, или их масса m.

Линейные параметры могут определять технологическое назначение КШМ (технологические линейные параметры), быть связанными с ее монтажом (установочно-монтажные линейные параметры) или характеризовать крепление инструмента (линейные параметры элементов крепления).

К *технологическим линейным параметрам* относятся размеры рабочего пространства, определяющие габариты инструмента, исходной заготовки и готового изделия и ход рабочего органа машины. Технологические линейные параметры вносят в таблицы стандартов.

К *установочно-монтажным линейным параметрам* относят габариты машины и мест ее крепления к основанию (стандартизации не подлежат). Масса машины также является установочно-монтажным параметром, внесение которого в стандарты не обязательно. Линейные параметры элементов крепления рабочего инструмента содержатся в стандартах.

Скоростным параметром для однотипных машин является *быстроходность,* т.е. число холостых ходов (циклов) рабочего звена (ползуна, ударной массы) в минуту.

Энергетические параметры характеризуют двигатель или энергоноситель. Если энергетические параметры являются заданными величинами, например давление воздуха для привода паровоздушного молота, то их вносят в стандарты. К критериям сравнения различных конструкций КШМ, относятся: относительная масса конструкции, энергоемкость, быстроходность, эффективность использования потребляемой энергии, экологичность.

Относительная масса выражается коэффициентом массы: отношением силы тяжести mg машины к максимальной силе F_m, развиваемой машиной:

$$k_m = \frac{mg}{F_m}. \qquad (4.4)$$

Энергоемкость (или энергонасыщенность) выражают отношением эффективной энергии машины $T_э$ к работе силы тяжести рабочих частей mg на наибольшем ходе H_m, т. е. коэффициентом энергоемкости движения рабочих частей машины

$$k_э = \frac{T_э}{mgH_m}. \qquad (4.5)$$

Эффективность использования потребляемой энергии выражается отношением полезной работы деформирования поковки $A_Д$ к энергии E, затраченной машиной в течение одного машинного цикла t_M, т. е. эффективным КПД машины. Например, для кривошипного и гидравлического с насосным приводом пресса

$$\eta_э = \frac{A_д}{E} = \frac{\int_0^{s_д} F_д(s)\,ds}{\int_0^{t_д} N_э(t)\,dt}, \qquad (4.6)$$

где F_a – деформирующая сила; s, s_n – перемещение и рабочий ход;

N – мощность электродвигателя; t - время.–

Поскольку при проектировании машины не всегда удается рассчитать эффективный КПД, для гидровинтовых прессов и гидромолотов можно воспользоваться коэффициентом мощности k_N, т.е. отношением произведения эффективной энергии на число рабочих ходов $T_э n_p$ к установленной мощности электродвигателя $N_э$:

$$k_N = \frac{T_э n_p}{60 N_э}.$$

Наиболее высоким эффективным КПД обладают гидравлические прессы, гидравлические молоты и гидровинтовые прессы. Наименьшие значения показывают паровоздушные молоты. При проектировании следует добиваться наибольшего значения эффективного КПД.

Экологичность выражается несколькими показателями, характеризующими степень воздействия машины на окружающее пространство и оператора: уровни шума, вибраций, электромагнитного излучения; температура, влажность и т.п.

Контрольные вопросы

1. Классификация КШМ
2. Главные параметры характеризующие КШМ
3. Основные критерии сравнения различных конструкций КШМ
4. Принципиальные схемы кузнечно-штамповочных машин
5. Каким коэффициентом выражается энергоемкость
6. Какие машины обладают наиболее высоким КПД

5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫЕ МАШИНЫ

5.1. Принцип действия, классификация

Принцип действия. К гидравлическим КШМ относятся гидравлические прессы, гидростаты, гидромолоты, гидровинтовые прессы, гидроимпульсные и гидровибрационные прессы и другие, энергоносителем привода которых служит рабочая жидкость.

Гидравлическими прессами называются КШМ почти статического (квазистатического) воздействия на деформируемый материал силой давления жидкости на поршень или плунжер рабочего исполнительного механизма (рисунок 5.1). Гидравлические прессы относятся к энерготипу $T_{ЭР}$ – машин, использующих эффективную энергию в виде энергии давления (см. табл. 1.1).

Принцип действия гидравлических прессов основан на законе Паскаля о сообщающихся сосудах (рисунок 5.1, а), согласно которому давление $p = \frac{F}{S}$, создаваемое силой F, действующей на площадь плунжера S (например, насоса), распространяется по всему объему жидкости и создает большую в S_1/S силу $F_1 = pS_1$ (например, в цилиндре пресса), которая во время рабочего хода может деформировать материал. Перемещения поршней s и s_1 площадью соответственно S и S_1 связаны соотношением, которое следует из условия постоянства объема жидкости:

$$s_1 = sS/S_1. \qquad (5.1)$$

Объем жидкости, подаваемой насосом в единицу времени, называется подачей насоса Q_H. За счет подачи насоса плунжер или поршень пресса (рисунок 5.1, *б)* перемещается со скоростью $v = Q_H/S_1$.

В прессе с насосно-аккумуляторным приводом (Рисунок. 5.1, *в)* применяют аккумулятор для накопления жидкости под давлением, поступающей от насоса во время пауз в работе пресса и для увеличения скорости во время деформирования поковки.

В *гидростатах* давление рабочей жидкости непосредственно воздействует на деформируемый с очень малой скоростью материал.

В *гидровинтовых прессах* и *гидравлических молотах* разгон поршня и рабочей массы рабочих частей (рабочей массы) m гидравлического молота (или приведенной массы гидровинтового пресса) на перемещении до рабочего хода создает кинетическую энергию $T = mv^2/2$ и дает возможность воздействовать на деформируемый материал ударом.

В *гидроимпульсных и гидровибрационных прессах* воздействие на материал осуществляется импульсом ударной волны или циклическими импульсами жидкости под давлением.

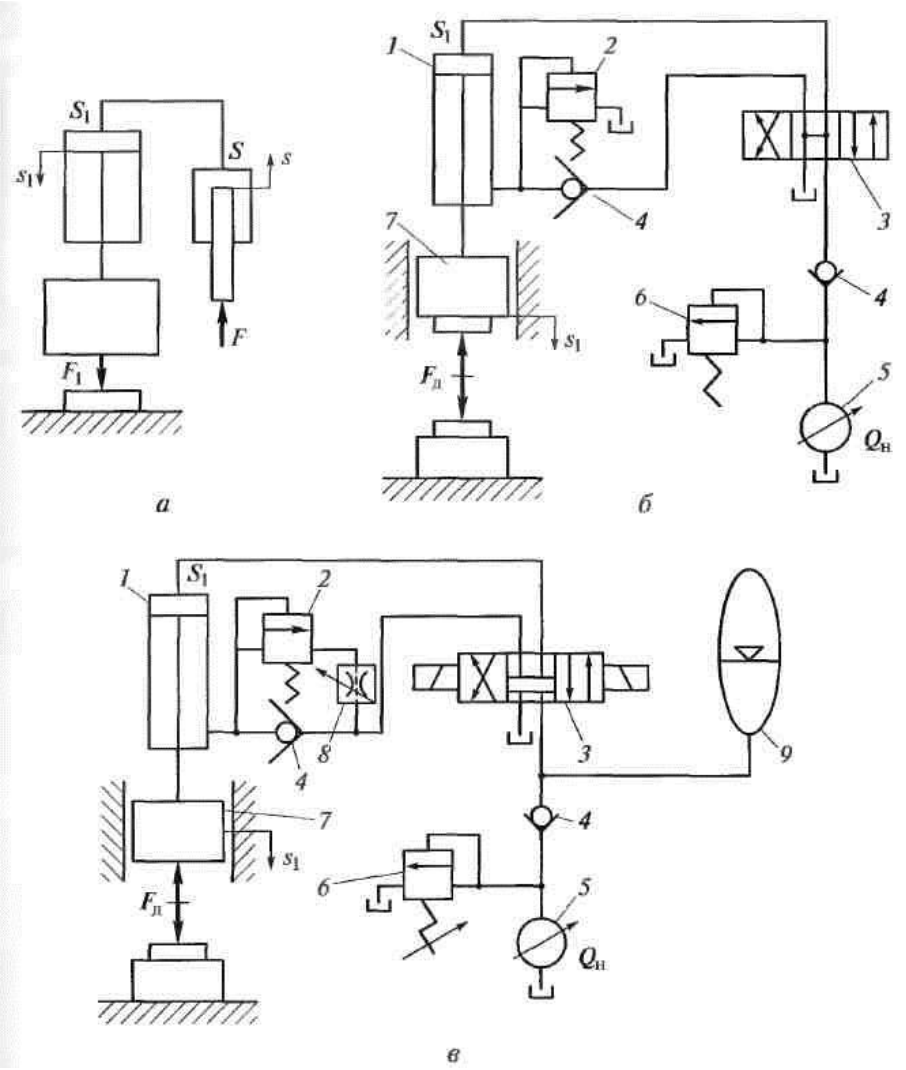


Рисунок 5.1. – Принцип действия *(а)* и принципиальные схемы гидравлических прессов с насосным приводом *(б)* и насосно-аккумуляторным приводом *(в)*:
s, s_1 – перемещения; *S*, S_1 – площадь соответственно плунжера и поршня; *F*, *F*, и F_1 – силы; $Q_Н$ – подача насоса; 1 – рабочий цилиндр; *2* – поддерживающий клапан; *3* – распределитель; *4* – обратный клапан; 5 – насос; *6* – предохранительный клапан; 7 – ползун; *8* – дроссель; *9* – аккумулятор

Классификация. Гидравлические прессы классифицируют по компоновке конструкции – на вертикальные и горизонтальные; по числу рабочих цилиндров – на одноцилиндровые, трехцилиндровые и многоцилиндровые; по конструкции станины – на колонные, рамные, скрепленные (лентой, проволокой), двухстоечные, одностоечные; по типу привода – на насосные, насосно-аккумуляторные и мультипликаторные.

Классификация по технологическому назначению приведена [4] на рисунке 5.2.

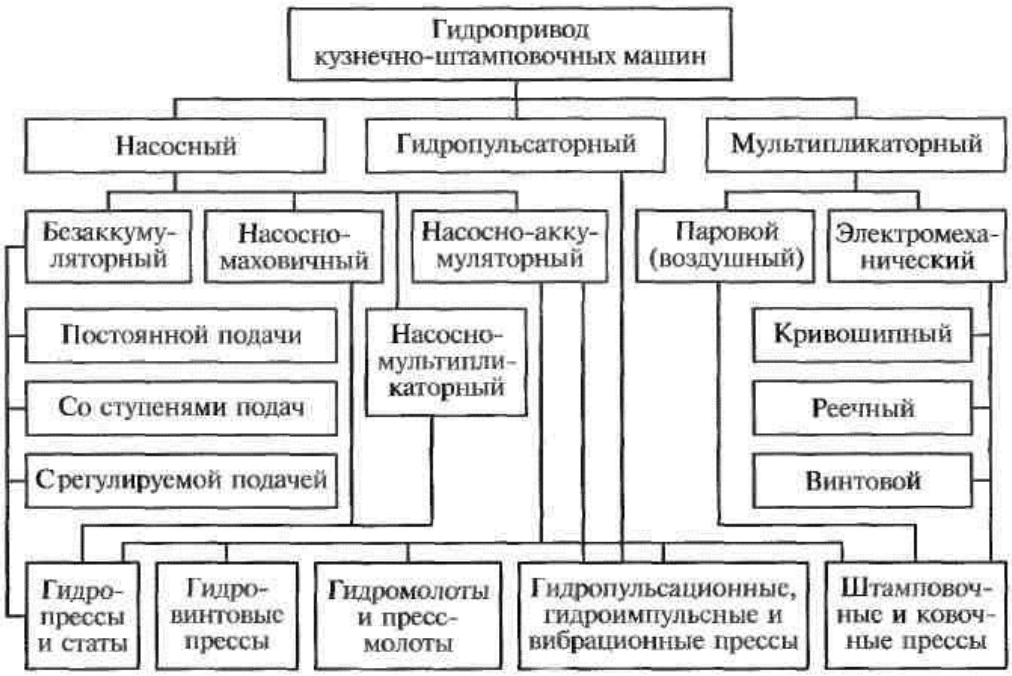


Рисунок 5.2. – Классификация гидропривода

По характеру воздействия на деформируемый материал современные гидравлические КШМ разделяют на машины статического, квазистатического, ударного, импульсного и вибрационного (пульсирующего) действия. К машинам квазистатического действия относят гидравлические прессы, статического действия – установки для гидростатического прессования и синтеза материалов – гидростаты. К машинам динамического или ударного действия отнесены гидравлические молоты и гидровинтовые прессы.

В гидравлических прессах энергия жидкости $E_{ж}$ создает работу деформирования $A_{Д}$ материала во время рабочего хода $s_{Д}$, а ход приближения и возвратный являются холостыми:

$$E_{ж} = S_1 \int_0^{s_д} p_1(s)\,\mathrm{d}s \rightarrow A_{д} = \int_0^{s_д} F_{д}(s)\,\mathrm{d}s, \tag{5.2}$$

где S_1, – площадь цилиндра пресса; $F_Д$ – деформирующая сила (сила сопротивления материала деформированию).

В гидравлических молотах и гидровинтовых прессах энергия жидкости сначала трансформируется в кинетическую энергию рабочих частей $T_э$ во время хода разгона $s_р$, а затем в работу деформирования:

$$E_{ж} = S_1 \int_0^{s_р} p_1(s)\,\mathrm{d}s \rightarrow T_э \rightarrow A_{д} = \int_0^{s_д} F_{д}(s)\,\mathrm{d}s. \tag{5.3}$$

В гидровинтовых пресс-молотах энергия жидкости трансформируется в кинетическую энергию рабочих частей во время хода разгона и, продолжая действовать во время рабочего хода ($s_Р$+ $s_д$), суммируется с кинетической

энергией, а работа деформирования в этом случае выполняется суммарным воздействием кинетической энергии и энергии давления жидкости:

$$E_{ж} = S_1 \int_0^{s_р + s_л} p_1(s)\,ds \to T + \int_0^{s_л} F_л(s)\,ds \to A_л. \tag{5.4}$$

5.2. Расчет основных конструктивных параметров кузнечно-штамповочных машин

К главному размерному параметру пресса относится номинальная сила, к основным характеристикам – открытая высота, номинальная сила, наибольший ход, площадь стола, быстроходность (число полных ходов в минуту).

Деформирующая сила $F_Д$, развиваемая прессом в процессе деформирования материала с определенной скоростью v, без учета инерционных сил

$$F_д = zp_1S_1 = z(p_и - \zeta v^2)S_1, \tag{5.5}$$

где z – число рабочих цилиндров; p_1 – давление жидкости в цилиндре; S_1 – площадь рабочего цилиндра; $p_И$ – давление источника жидкости (насоса или аккумулятора); ζ – гидравлическое сопротивление потоку жидкости, приведенное к скорости поршня; v – скорость поршня (плунжера).

Номинальной является сила, создаваемая цилиндрами пресса при неподвижном упоре штампов или бойков. Тогда в выражении (5.5) скорость v равна нулю и давление в цилиндре $p_1=p_И$

$$F_н = zp_иS_1. \tag{5.6}$$

Как это следует из выражения (7.1) деформирующая сила пресса всегда меньше номинальной из-за потерь давления жидкости в гидросистеме.

Контрольные вопросы

1. Что называется гидравлическими прессами?
2. Принцип действия гидравлических КШМ?
3. Классификация гидропривода КШМ?
4. Классификация по характеру воздействия на деформируемый материал гидравлических КШМ
5. Главные параметры пресса?

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЛИСТОШТАМПОВОЧНЫЕ ПРЕССЫ

6.1. Классификация и основные параметры

По технологическому назначению, листоштамповочные прессы подразделяют на прессы простого, двойного и тройного действия. Прессы простого действия (с одним рабочим ползуном) предназначены для выполнения операций листовой штамповки: вырубки, пробивки, гибки, неглубокой формовки и вытяжки с прижимом фланца гидравлической подушкой, встроенной в стол. Прессы двойного действия (с двумя – прижимным наружным и вытяжным внутренним ползунами) предназначены для операций глубокой вытяжки, требующих прижима фланца листовой заготовки. В прессах тройного действия кроме двух ползунов, как у прессов двойного действия, предусматривается дополнительный третий ползун в столе пресса для проведения операций глубокой вытяжки с противодавлением.

Привод прессов для штамповки листовых заготовок в холодном состоянии преимущественно насосный с насосами постоянной и регулируемой подачи. Для штамповки листа в горячем состоянии применяют насосно-аккумуляторный привод, обеспечивающий повышенную скорость рабочего хода.

Одностоечные прессы силой 0,4... 2,5 МН по ГОСТ 9753-86 имеют два конструктивных варианта: 1-го исполнения – правильные, 2-го исполнения – базовые, с гидроподушкой, с гидроподушкой и шиберным устройством, с поворотным столом. Ход ползуна пресса с насосным приводом составляет 500 мм, скорость хода приближения – 125...250 мм/с, рабочего хода – 16...32 мм/с, возвратного – ПО...350 мм/с.

Основные параметры и размеры прессов колонной конструкции с номинальной силой 0,4...20 МН регламентируются ГОСТ 7901-86.

Вытяжные прессы рамной двухстоечной конструкции изготовляют с номинальной силой 1...4 МПа, наибольшим ходом 1 500...2500 мм, скоростью холостого хода приближения 350 мм/с, с регулируемой от 225 до 130 мм/с скоростью рабочего хода, что обеспечивает наименьшее время цикла в пределах 12...26 с.

Листоштамповочные прессы двойного действия, колонного исполнения станины с гидроподушкой в столе выпускают с номинальной силой вытяжной поперечины 0,8...6,3 МН с тремя ступенями силы величиной примерно 1/3, 2/3 и 1,0 номинальной силы. Прижимная поперечина обеспечивает силу 0,5... 1,0 МН. Ход поперечин составляет 1700...2500 мм; скорость холостого хода приближения – 200...300 мм/с, рабочего хода вытяжной поперечины – 20...33 мм/с при насосном приводе и 100 мм/с при насосно-аккумуляторном.

6.2. Конструктивные схемы и конструкции

Прессы одностоечные со средствами механизации и автоматизации обладают широкими технологическими возможностями. Их используют для выполнения монтажно-запрессовочных операций, листовой штамповки, гибки, отбортовки и вытяжки, прошивки, протяжки или калибровки отверстий; обработки неметаллических материалов и прессования металлопорошков. Прессы оснащают гидроподушкой, выполняющей функции нижнего выталкивателя и прижима заготовки при вытяжке, а также поворотными делительными столами и шиберными устройствами для штучных заготовок.

Прессы листоштамповочные отбортовочные с ЧПУ предназначены для выполнения различных операций листовой штамповки: гибки листов в разных плоскостях и на разные углы в закрытых и открытых штампах (универсальная гибка); последовательной отбортовки труб и деталей типа днищ; гибки различных профилей; штамповки днищ; отбортовки фланцев и цилиндрических обечаек (рисунок 6.1) [4].

Прессы двухстоечные вытяжные простого действия предназначены для холодной вытяжки полых изделий из листа. Конструкция прессов рамная, со стяжными колоннами. Основные силовые детали станины: стол и верхняя поперечина – стальные, стойки – чугунные.

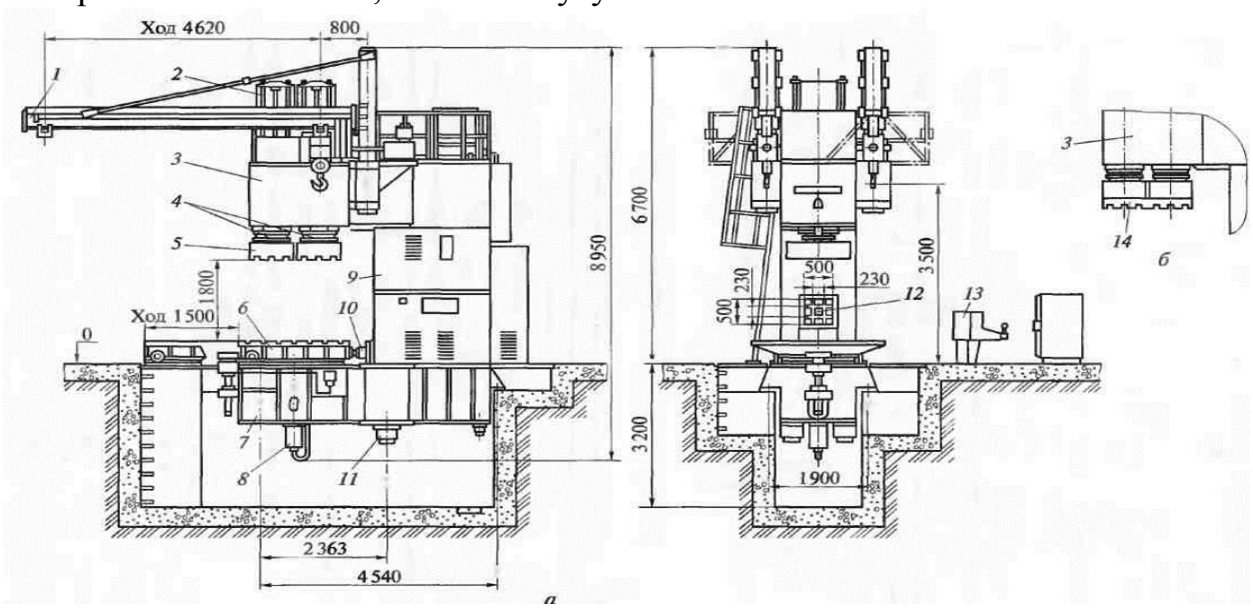


Рисунок 6.1. – Конструкция гидравлического листоштамповочного одностоечного пресса с ЧПУ модели П3236 силой 1,6 МН с раздельным *(а)* и совместным *(б)* использованием гидроцилиндров:

1 – кран-балка; *2* – возвратные цилиндры; *3* – верхняя поперечина; *4* – рабочие цилиндры; *5* – надштамповая плита; *6* – выдвижной стол; 7 – нижняя поперечина; *8* – выталкиватель; *9* – проставки; *10* – гидравлический цилиндр привода стола; 11 – стяжная колонна станины; *12* – боковой цилиндр; *13* – пульт управления: *14* – рабочая плита

Под столом пресса расположен механизм выгрузки изделий качающегося типа с самостоятельным приводом. Работа его согласована с циклом работы пресса. С фронта пресса установлен механизм загрузки

заготовки. Заготовки загружаются горизонтально, а механизм поворачивает их в вертикальное положение и переносит в зону штампа. Механизмы загрузки и выгрузки выполнены таким образом, что обеспечивают работу пресса как с одним, так и с двумя пуансонами.

Прессы листоштамповочные двойного действия (колонные) предназначены для холодной и горячей вытяжки из толстого листа деталей типа днищ, сосудов, резервуаров, котлов и других деталей. Например, конструкция пресса номинальной силой 20/10 МН предназначена для горячей вытяжки изделий максимальным диаметром до 4 000 мм из листовых заготовок. Пресс имеет две поперечины – наружную прижимную и внутреннюю вытяжную, а также нижний выталкиватель, который может выполнять функции гидроподушки. Пресс может работать также в режиме простого действия силой 30 МН при смыкании ползунов гидравлическим замком.

Контрольные вопросы

1. Виды изделий, получаемые на гидравлических листоштамповочных прессов?
2. Классификация гидравлических листоштамповочных прессов?
3. Основные узлы гидравлических листоштамповочных прессов?

7. КРИВОШИПНЫЕ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫЕ МАШИНЫ

Принцип действия кривошипных КШМ (прессов и автоматов) основан на использовании для деформирования металла кинетической энергии вращательного движения маховика, передаваемой исполнительному звену – ползуну с помощью кривошипно-ползунного или эксцентрикового механизма. Во время рабочего хода часть этой энергии расходуется на полезную работу деформирования поковки.

Кривошипные прессы и автоматы относятся к электромеханическим системам технологических машин обработки давлением (рисунок 7.1).

Кинематические связи между всеми звеньями кривошипно-ползунного механизма жесткие; изменение перемещения и скорости ползуна пресса зависят (без учета упругих деформаций) только от кинематики механизма [4].

Главным рабочим механизмом служит кривошипно-ползунный механизм или его модификации (рисунок 7.2):

кривошипно-коромысловый (рисунок 7.2, *а),* создающий смещенный нажим рабочего звена – коромысла и применяемый в автоматах для штамповки изделий, подобных стержню с эксцентричной головкой, как, например, костыли для крепления железнодорожных шпал;

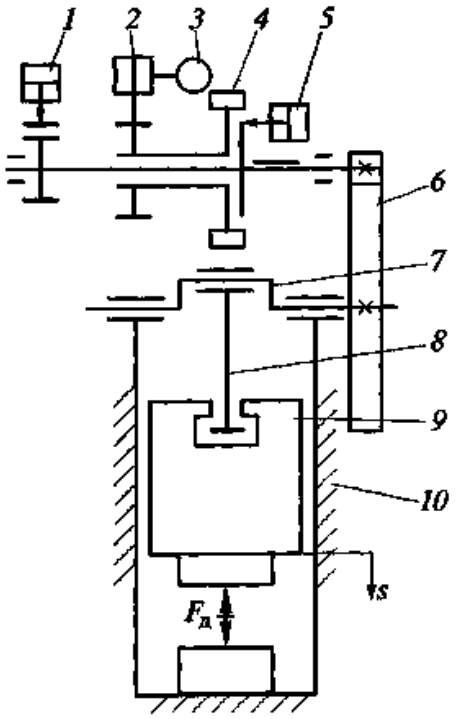


Рисунок 7.1. – Принципиальная схема кривошипного пресса:
1 – тормоз; *2* – клиноременная передача; *3* – электродвигатель; 4 – маховик;
5 – муфта; *6* – зубчатая передача; 7 – кривошипный (эксцентриковый вал); *8* – шатун;
9 – ползун; *10* – станина; *s* – перемещение ползуна; $F_Д$ – деформирующая сила

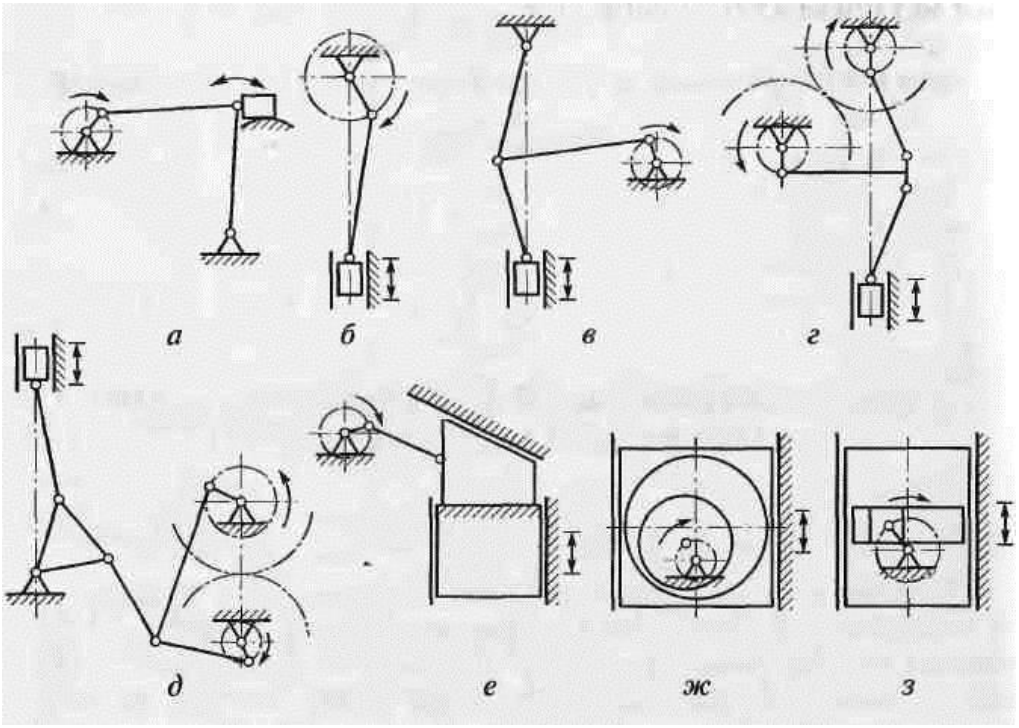


Рисунок 7.2. – Модификации кривошипного механизма:
а – кривошипно-коромысловый; *б* – кривошипно-ползунный аксиальный; *в* – кривошипно-коленный; *г* – двухкривошипный коленный; *д* – двухкривошипный коленно-ползунный; *е* – кривошипно-клиновой;
ж – кривошипно-круговой; *з* – кривошипно-кулисный

кривошипно-ползунный аксиальный (рисунок 7.2, *б),* получивший наиболее широкое применение в конструкциях кривошипных прессов и автоматов вследствие простоты устройства и надлежащих кинематических параметров. Его модификация – дезаксиальный механизм, у которого ось движения ползуна не совпадает с осью вращения кривошипа;

кривошипно-коленный (рисунок 7.2, *в),* создающий при небольшой тяговой (толкающей) силе на шатуне большую технологическую силу на ползуне, при уменьшенной величине хода по сравнению с прессами по схеме, представленной на рисунке 7.2, *б;* применяют этот механизм в чеканочных прессах, прессах для холодной объемной штамповки и прессах для выдавливания;

двухкривошипный коленный с двумя степенями подвижности (рисунок 7.2, *г),* применяемый для листоштамповочных прессов. Он позволяет получить увеличенный ход ползуна при соответствующей установке тихоходных колес на кривошипных валах и достаточном постоянстве скорости движения ползуна, что имеет решающее значение для глубокой вытяжки листовых материалов;

двухкривошипный коленно-ползунный (рисунок 7.2, *д),* применяемый в прессах (автоматах) тройного действия для чистовой вырубки;

кривошипно-клиновой (рисунок 7.2, *е),* применяемый в конструкциях кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП) и некоторых типах автоматов для объемной штамповки; благодаря клиновому механизму

значительно уменьшаются силы в кривошипно-шатунной группе, но высота пресса с таким механизмом увеличивается;

кривошипно-круговой (рисунок 7.2, *ж)* применяют в специализированных вырубных прессах и автоматах с коротким ходом; обладает высокой продольной жесткостью, но давление на направляющие ползуна увеличено;

кривошипно-кулисный (рисунок 7.2, *з),* обладающий повышенной продольной жесткостью, точностью направления ползуна, но сложный для наладки; его применяют в некоторых конструкциях КГШП, горизонтально-ковочных машин (ГКМ).

Привод пресса осуществляется от электродвигателя с маховиком. Поскольку параметры движения исполнительного звена – ползуна, зависят только от металлических (жестких) кинематических звеньев главного рабочего механизма, кривошипные прессы относят к нерегулируемым машинам с ограниченным перемещением ползуна, равным двойному радиусу кривошипа или двойному эксцентриситету эксцентрика.

Асинхронный электродвигатель мощностью N_3 разгоняет маховик и все ведущие звенья с моментом инерции J до установившейся угловой скорости ω_0 за время технологического цикла *t* и сообщает ему кинетическую энергию вращательного движения маховика

$$T_{ком} = J\omega_0^2/2. \qquad (7.1)$$

При этом кривошипный вал и все ведомые звенья кривошипно-ползунного механизма неподвижны, ползун находится в крайнем верхнем (исходном) положении. При включении муфты (см. рисунок 7.1) приводится во вращение кривошипный вал, ведущие и ведомые звенья движутся вместе, ползун с закрепленным на нем верхним штампом совершают холостой ход *s* (рисунок 7.3). При встрече с заготовкой во время рабочего хода $s_Д$, ведущие и ведомые звенья замедляют движение до конечной угловой скорости

$\omega 1 = (1 - \varepsilon_Н)\omega_0$ обусловленной номинальным скольжением асинхронных электродвигателей с коротко замкнутым ротором (с нормальным $\varepsilon_Н$= 0,08...0,12 или повышенным $\varepsilon_Н$ = 0,15...0,2 скольжением). Соответствующая часть накопленной кинетической энергии маховика и других звеньев называется *эффективной энергией пресса*

$$T_{эф} = J\left(\omega_0^2 - \omega_1^2\right)/2 \qquad (7.2)$$

и расходуется на работу деформирования $A_Д$ для выполнения технологической операции с силой $F_Д(s)$ на перемещении $s_Д$

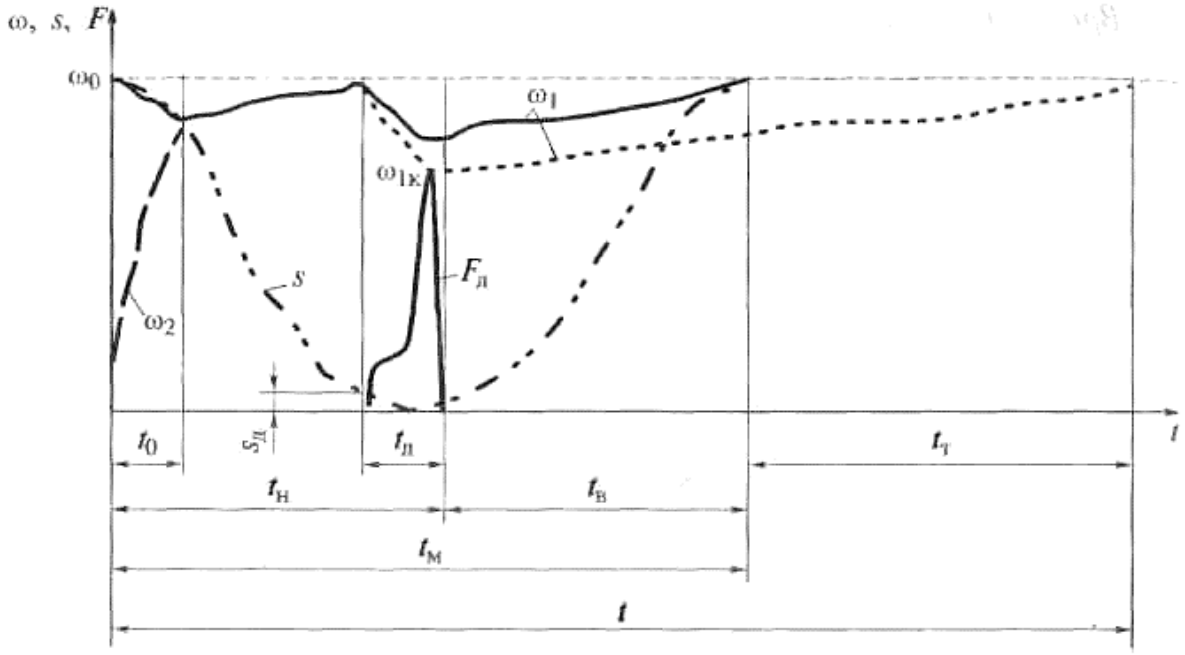


Рисунок 7.3 – Цикловая диаграмма работы кривошипных машин:

t_0, $t_Д$, t_H, t_B, t_T, t_M, t – соответственно время включения муфты, рабочего хода (деформирования), хода ползуна вниз (вперед), возвратного хода, технологической паузы, машинного цикла, технологического цикла;ω_0, ω_1, ω_2 – угловая скорость соответственно установившаяся, ведущих дисков муфты, ведомых дисков муфты; s – перемещение ползуна; $s_д$ – перемещение ползуна во время деформирования; $F_Д$- технологическая сила деформирования поковки

$$\eta_П \int_0^t N_э(t)\,dt = T_{э\omega} = J\left(\omega_0^2 - \omega_1^2\right)/2 = \\ = A_д/\eta_д = 1/\eta_д \int_0^{s_д} F_д(s)\,ds, \qquad (7.3)$$

где $\eta_П \approx 0{,}8...\ 0{,}85$; $\eta_Д \approx 0{,}35...\ 0{,}55$ – КПД привода и рабочего хода деформирования соответственно; J – момент инерции.

Время технологического цикла при работе пресса одиночными ходами $t = t_M + t_T$, где $t_M = 60/n$ – *время машинного цикла* (n – число ходов ползуна в минуту – быстроходность пресса); t_T – *время технологической паузы* (см. Рисунок. 7.3).

Для прессов-автоматов и прессов, работающих непрерывными ходами с быстроходностью n, время технологического цикла равно времени машинного цикла; производительность П = 60/t.

После завершения рабочего хода ползун совершает возвратный ход. Если пресс работает одиночными ходами, то при достижении ползуном исходного положения муфта выключается и одновременно включается тормоз. Ползун останавливается в верхнем (исходном) положении и машинный цикл завершен.

Технологическая пауза предусмотрена для работы средств автоматизации. Суммарное время машинного цикла и технологической паузы используется электродвигателем для восполнения затраченной кинетической энергии маховика и ведущих звеньев, необходимой для следующего цикла (пунктирная линия на рисунке 7.3).

У пресса, работающего непрерывными автоматическими ходами, или у пресса-автомата муфта остается включенной и машинные циклы повторяются до принудительного выключения муфты. Для возмещения затраченной кинетической энергии используется только время возвратного хода ползуна и поэтому мощность электродвигателя у таких машин обычно значительно выше.

7.2. Приближенные характеристики кинематических параметров

Для выяснения принципиальных особенностей кривошипных КШМ и приближенных расчетов целесообразно рассмотреть схему идеального кривошипно-шатунного механизма без учета трения в соединениях звеньев (рисунок 7.4, *а).*

Крутящий момент на кривошипном валу с радиусом R из треугольника сил

$$M_к = RT = RP\sin(\alpha + \beta). \tag{7.4}$$

Обычно отношение радиуса кривошипа к длине шатуна L

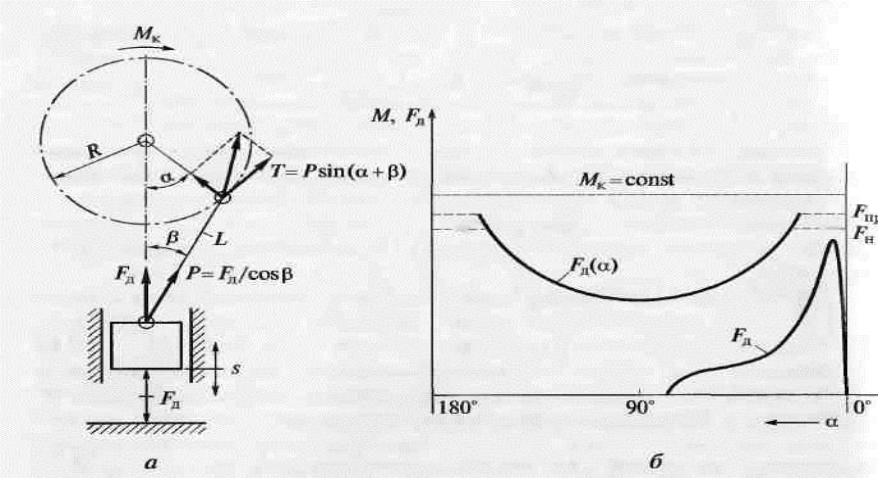


Рисунок 7.4 – Кинематическая схема центрального механизма кривошипного пресса без учета трения *(а)* и изменение силы, создаваемой прессом, на ползуне $F_Д(a)$ при постоянном крутящем моменте муфты *(б):*

R – радиус кривошипа; L – длина шатуна; F_R – сила сопротивления деформированию (деформирующая сила); F_H - номинальная сила; $F_{пр}$ – сила, ограниченная предохранителем; P – составляющая деформирующей силы; a – угол поворота кривошипа; р – угол отклонения шатуна от вертикальной оси

$$\lambda = \frac{R}{L} = \frac{1}{10} \quad \text{или} \quad \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = \frac{1}{10}. \tag{7.5}$$

Тогда сила, создаваемая крутящим моментом на ползуне пресса при R - $s_m/2$ ($s_m = 2R$ – полный ход ползуна):

$$F_д = P\cos\beta = \frac{T\cos\beta}{\sin(\alpha+\beta)} = \frac{2M_к\cos\beta}{s_m\sin(\alpha+\beta)}. \quad (7.6)$$

В конце хода ползуна углы аир приближаются к нулю и, при постоянном крутящем моменте M_K создаваемая приводом сила $F_Д(a)$ на ползуне стремится к бесконечности, но по условию прочности пресса ограничивается номинальным значением F_H (рисунок 7.5, *б).*

Перемещение ползуна до крайнего нижнего положения найдем из геометрических соотношений (см. рисунок 7.5, *а)*

$$s = (R+L) - (R\cos\alpha + \sqrt{L^2 - R^2\sin^2\alpha}) \text{ или}$$

$$s = R(1-\cos\alpha) + L\left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R}{L}\right)^2\sin^2\alpha}\right]. \quad (7.7)$$

Разлагая подкоренное выражение в биноминальный ряд и ограничиваясь двумя членами разложения, получим значение корня $\sqrt{1-(\frac{R}{S})^2 sin^2\alpha} \approx 1 - 1/2(R/L)^2 sin^2\alpha$ и выражение (7.7) можно заменить следующим [7]:

$$s \approx R(1-\cos\alpha) + \frac{R^2}{2L}\sin^2\alpha. \quad (7.8)$$

Для малых углов ос вблизи крайнего нижнего положения ползуна $\sin^2$а ~ 0 получим приближенное выражение

$$s \approx R(1-\cos\alpha) = s_m/2(1-\cos\alpha). \quad (7.9)$$

Скорость ползуна получим дифференцированием (14.9) и опуская малые второго порядка

$$v = \frac{ds}{d\alpha}\frac{d\alpha}{dt} = \omega\frac{ds}{d\alpha} \approx R\omega\sin\alpha = \frac{s_m\pi n}{60}\sin\alpha. \quad (7.10)$$

Скорость ползуна в функции перемещения получим из (14.10), используя геометрические соотношения из Рисунок. 7.5, *а* [7]

$$v \approx \frac{\pi n}{30}s\sqrt{\frac{s_m}{s} - 1}. \quad (7.11)$$

7.2 Деформирующая сила и энергия деформирования

Рассмотрим с принципиальных позиций характеристику деформирующей силы кривошипных прессов. Как это следует из рисунок 7.5 и зависимости (7.6) при угле р, значительно меньшем а, во время рабочего хода (β≈0, cosβ≈1)

$$F_д = \frac{2M_к \cos\beta}{s_m \sin(\alpha+\beta)} \approx \frac{2M_к}{s_m \sin\alpha}. \quad (7.12)$$

При постоянной величине крутящего момента $M_к$, передаваемого муфтой, величина деформирующей силы, развиваемой прессом, переменная и может достигать больших значений.

Величина энергии (работы) деформирования, которую может затратить пресс, меньше эффективной энергии по зависимости (7.2) из-за потерь энергии на трение и упругую деформацию станины и других элементов конструкции пресса. Эти потери можно оценить коэффициентом полезного действия рабочего хода $\eta_д \approx 0{,}35...0{,}55$ [7].

$$A_д = \eta_д T_{эф}. \quad (7.13)$$

Величина эффективной энергии, которую должен восполнить электродвигатель перед началом каждого следующего цикла, зависит от номинального скольжения асинхронного электродвигателя. Если принять для электродвигателя с повышенным скольжением $\varepsilon_н = 20$ %, то $\omega_1 = 0{,}8\omega_0$ и,

$$T_{э.р} = (1 - 0{,}8^2) T_{эф} = 0{,}36 T_{эф}. \quad (7.13)$$

Только около 36 % эффективной энергии пресса, запасенной маховиком, можно использовать во время рабочего хода. Обычно скольжение электродвигателя составляет 0,08...0,12 и используемая энергия меньше.

С учетом КПД рабочего хода $\eta_д = 0{,}5$ располагаемая прессом энергия (работы деформирования) во время рабочего хода

$$A_д = [1 - (1 - s_н)^2]\eta_д T_{эф} \approx (0{,}36 \cdot 0{,}5) T_{эф} = 0{,}18 T_{эф}, \quad (7.13)$$

что составляет в среднем приблизительно 18...20% эффективной энергии.

Контрольные вопросы

1. Принцип действия кривошипных КШМ?
2. Модификации кривошипного механизма КШМ?
3. Основные характеристики кинематических параметров КШМ?
4. Кинематическая схема центрального кривошипного механизма?

8. ШТАМПОВОЧНЫЕ И КОВОЧНЫЕ МОЛОТЫ
8.1. Принципы действия и классификация молотов

Принцип действия. Молотами называются КШМ ударного действия, в которых энергия привода перед ударом преобразуется в кинетическую энергию движения рабочих масс с закрепленными на них штампами, а во время удара – в полезную работу деформирования поковки. Для привода молотов используют пар, сжатый воздух или газ, жидкость под давлением, горючую смесь, взрывчатые вещества, электромагнитное и гравитационное поля.

Принцип действия молотов заключается в разгоне рабочих масс до скорости v силой F с затратой работы привода $A_П$ во время перемещения s_p массы рабочих частей (ударной массы m) по направлению к поковке и накопления кинетической энергии $T_э$ (которая называется эффективной энергией молота) и использования ее для полезной работы деформирования поковки $A_д$:

$$A_п = \int_0^{s_p} F(s)\,ds = \eta_п T_э = \eta_п m v^2/2 = \eta_д A_д = \eta_д \int_0^{s_д} F_д(s)\,ds, \quad (8.1)$$

где $\eta_П$ – КПД привода при разгоне; $\eta_Д$- КПД ударного деформирования поковки; $A_Д$ – работа деформирования поковки, выполняемая за один удар; $F_Д$ – деформирующая сила.

Классификация. По технологическому признаку молоты разделяют на ковочные – для свободной ковки, штамповочные – для объемной штамповки, листоштамповочные и выколоточные – для штамповки и выколотки по шаблону листовых материалов (Рисунок. 8.1).



Рисунок. 8.1. – Классификация молотов

В качестве основного признака классификации конструкций принят тип энергоносителя. По этому признаку молоты подразделяют на

конструктивные группы (рисунок 8.2) [4]. К первой группе (рисунок 8.2, *а)* относятся *паровоздушные молоты,* энергоносителями у которых является пар или сжатый воздух. Пар поступает к рабочему цилиндру по трубопроводу от паровых турбин, сжатый воздух – от компрессорной станции. Передаточный механизм паровоздушного молота состоит из поршня и штока. Исполнительным механизмом является ударная масса (баба) с закрепленным на ней бойком или штампом. Баба, штамп, шток и поршень образуют массу рабочих частей. Скорость при ударе составляет 7...9 м/с, частота ударов – 80...100 мин$^{-1}$.

Ко второй группе относятся *приводные пневматические молоты* (рисунок 8.2, *б).* Энергоносителем таких молотов является сжатый воздух, поступающий от встроенного компрессора. Компрессор с электродвигателем установлен непосредственно на молоте. При движении поршня компрессора, вследствие изменения объемов нижней и верхней полостей цилиндров, соединенных с помощью крана, в них происходит изменение давления воздуха, что вызывает движение рабочего поршня с верхним бойком или штампом. Функции передаточного и исполнительного механизма совмещены. Скорость при ударе составляет 4,5...5 м/с (7,5 м/с), частота ударов – 50...60 (95...220) мин$^{-1}$ согласно ГОСТ 712-85.

Электромагнитные молоты (рисунок 8.2, *в)* с приводом от электромагнитов и линейных статоров в промышленности пока не применяются. Такие молоты составляют третью группу.

К четвертой группе относятся *механические молоты* с приводом от электродвигателя с помощью механических передаточных Механизмов, состоящих из фрикционных, гибких и упругих связей (рисунок 8.2, *г).* В последнее время молоты четвертой группы не производят.

Пятую группу представляют *газогидравлические* и *гидравлические молоты* (рисунок 8.2, *д, ж).* Энергоносителем в газогидравлических молотах служит сжатый газ – азот, воздух, для возвратного хода применяют жидкость (минеральное или синтетическое масло, водные эмульсии). В гидравлических молотах жидкость под давлением от насосов и аккумуляторов воздействует на рабочий плунжер или поршень. Энергия давления жидкости при разгоне массы рабочих частей переходит в кинетическую энергию. Скорость при ударе составляет 5...6 м/с, частота ударов – 60...80 мин$^{-1}$.

К шестой группе относятся газовые *высокоскоростные молоты* (рисунок 8.2, *е),* энергоносителем в которых является газ – азот, и находящийся под высоким давлением в специальной полости над рабочим поршнем.

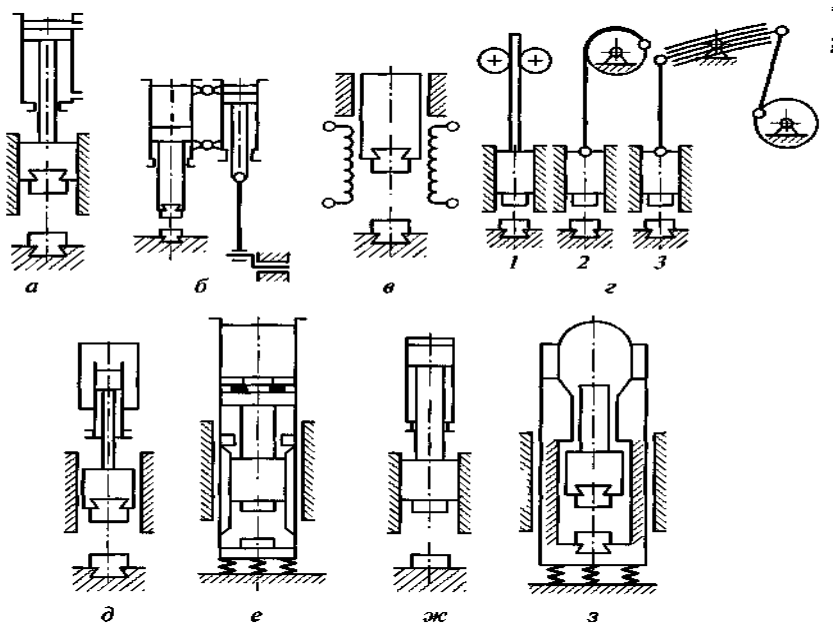


Рисунок 8.2. – Принципиальные схемы молотов:
а – паровоздушного; б – приводного пневматического; в – электромагнитного; г – механических: 1 – с доской; 2 – ремнем; 3 – рессорного; д – газогидравлического; е – высокоскоростного; ж – гидравлического; з – взрывного

При отрыве поршня от торцевого уплотнителя сжатый газ, воздействуя на поршень и верхнюю крышку цилиндра, вызывает разгон рабочих частей и, реактивно, станины с цилиндром. При разгоне рабочих частей и встречном движении станины внутренняя энергия газа переходит в кинетическую энергию движения масс. Скорость при ударе составляет 18...20 м/с, частота ударов – 5...10 мин$^{-1}$.

К этой же группе относятся *взрывные молоты* (рисунок 8.2, з), работающие по принципу некоторых двигателей внутреннего сгорания. Энергоносителем является смесь жидкого горючего вещества с воздухом. Скорость при ударе составляет 15...20 м/с, частота ударов – 50...60 мин$^{-1}$.

Молоты по кратности действия энергоносителя разделяются на две группы: простого и двойного действия.

У *молотов простого действия* движение вниз осуществляется силой тяжести рабочих частей. Работа силы тяжести переходит в кинетическую энергию, используемую для деформирования поковки. Возвратный ход (подъем) рабочих частей осуществляется паром, воздухом, газом, жидкостью под давлением, электродвигателем. К молотам простого действия относится большинство молотов четвертой группы за исключением пружинно-рессорных. Остальные конструкции – молоты двойного действия.

У *молотов двойного действия* движение вниз осуществляется под действием двух факторов: силы тяжести рабочих частей и энергии пара, воздуха, газа, жидкости, рессоры.

Дальнейшее подразделение молотов осуществляется по конструктивному исполнению шабота или детали, воспринимающей удар рабочей массы. Молоты с неподвижным перед ударом шаботом (жестким

или виброизолированным) называют *шаботными,* а с подвижным, двигающимся навстречу шаботом, – *бесшаботными.* К бесшаботным молотам относятся также импакторы – молоты с горизонтальным встречным движением двух масс.

По конструкции станины молоты могут быть *одностоечными* и *двухстоечными* (арочными и мостовыми).

У шаботных молотов без виброизоляции часть энергии передается на грунт, вызывая неблагоприятные вибрации. Виброизолированный шабот уменьшает энергию, передаваемую на грунт. Бесшаботные молоты незначительно воздействуют на грунт.

Главные параметры молотов. Главные размерные параметры молотов регламентируются государственными стандартами, например паровоз-душных штамповочных молотов – ГОСТ 7024-85, ковочных – ГОСТ 9752-85.

Главным размерным параметром конструкций молотов с неподвижным шаботом служит *ударная масса m* (масса рабочих частей, бабы молота). Размерные ряды молотов составлены по геометрической прогрессии со знаменателем 1,6 (например, паровоздушные штамповочные молоты с ударной массой 630...25000 кг).

Эффективная кинетическая энергия $T_э$, развиваемая ударной массой перед ударом, является вторым главным параметром молотов с неподвижным шаботом. Например, для паровоздушных штамповочных молотов с неподвижным шаботом эффективная кинетическая энергия $T_э$ = 16...630 кДж.

Скорость ударной массы (рабочих частей) перед ударом является зависимым параметром, который находится в диапазоне 5...9 м/с:

$$v = \sqrt{\frac{2T_э}{m}}. \qquad (8.2)$$

Для бесшаботных молотов главным размерным параметром является эффективная кинетическая энергия $T_э$, находящаяся в; диапазоне 20...800 кДж. Вторым параметром является скорость каждой ударной массы перед ударом.

8.2. Паровоздушные молоты

Ковочные молоты для свободной ковки изготавливают одностоечными и двухстоечными с арочной или мостовой станиной. Шабот ковочных молотов установлен отдельно от станины.

Штамповочные молоты двойного действия изготавливают с двухстоечной станиной (рисунок 8.3). В отличие от ковочных молотов шабот штамповочного молота является основанием всей машины. Согласно ГОСТ 7024-75 (штамповочные молоты) и ГОСТ 9752-75 (ковочные молоты) ударная масса штамповочных молотов составляет 630...25000 кг (ковочных –

630... 10000 кг), кратность масс – 20 для ковочных и 25 – для штамповочных молотов, эффективная энергия – 16...630 кДж, полный ход ударной массы 1000... 1600 мм.

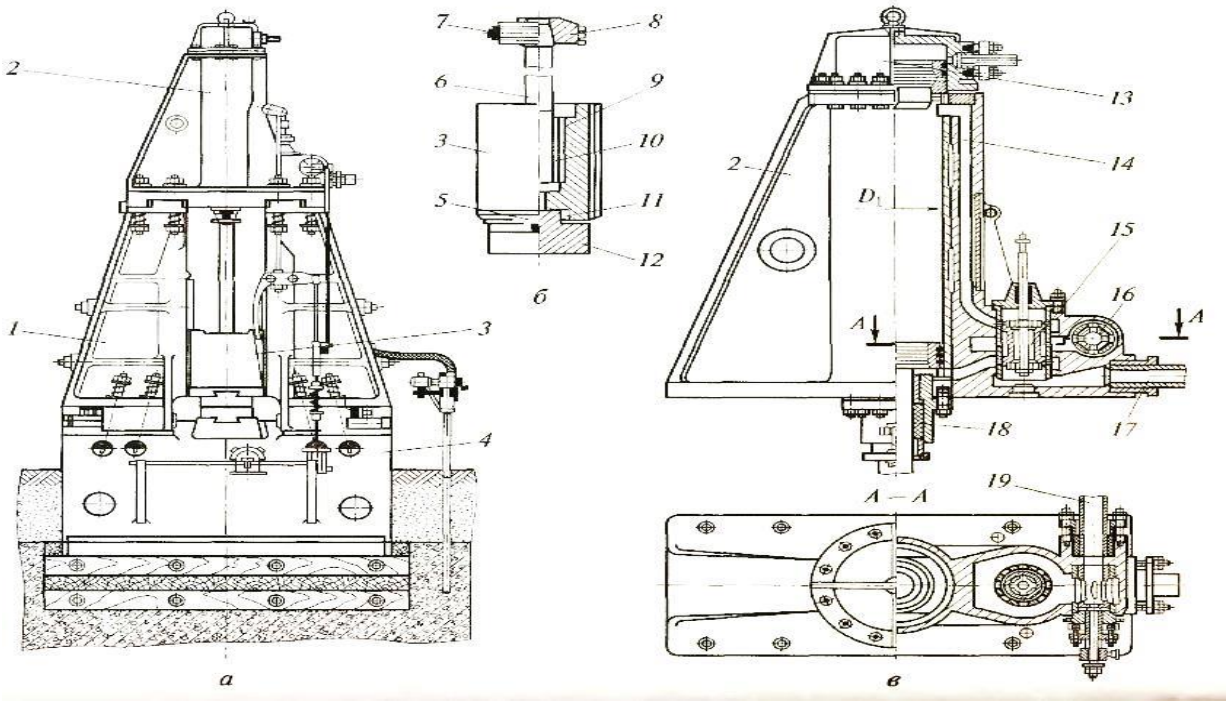


Рисунок. 8.3. Конструкция паровоздушного штамповочного молота:
а – общий вид; *б* – рабочие части; *в* – рабочий цилиндр; *1* – станина;
2 – рабочий цилиндр; *3* – ударная масса (баба); *4* – шабот; 5 – шпонка;
6 – шток; 7 – поршневые кольца; *8* – поршень; *9* – втулка; *ТО* – прокладка; *11* – клин;
12 – верхний штамп; *13* - буфер; *14* - втулка цилиндра;
15 – золотник; 6 – дроссель; *17* – отводящая труба; *18* – уплотняющая набивка;
19 – подводящая труба

Контрольные вопросы

1. Принцип действия паровоздушных молотов?
2. Классификация и принципиальные схемы молотов?
3. Главные параметры молотов?

9. ДВУХКАМЕРНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ГАЗОВОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Известны устройства для листовой штамповки, использующие энергию горючих газовых смесей [9]. В них штамповка осуществляется под действием давления газа. Эти устройства особенно эффективны в мелкосерийном производстве, вследствие их простоты и дешевизны.

Указанные устройства для листовой штамповки имеют существенный недостаток, обусловленный относительно низким уровнем давления, осуществляющего процесс штамповки. Это в целом снижает технологические возможности данного метода штамповки.

Для расширения технологических возможностей газовой штамповки необходимо существенно увеличить давление продуктов сгорания, действующих на поверхность штампуемой заготовки. Это может быть достигнуто путем предварительного сжатия топливной смеси непосредственно в рабочей полости устройства для штамповки. Это реализовано в двухкамерном устройстве для штамповки, схема которой показана на рисунке 9.1. Устройство содержит корпус 1, в котором выполнена цилиндрическая полость, разделенная поршнем 2 на нижнюю 3 и верхнюю 4 камеру сгорания. К корпусу 1 с помощью фланца 5 болтов 6 и гаек 7 присоединена матрица 8. В верхней части корпуса 1 выполнена кольцевая полость 9, в которой установлен кольцевой поршень 10. В верхней части корпуса 1 выполнены сквозные каналы 11, сообщающие камеру сгорания 4 с полостью 12. Эти каналы перекрываются тарельчатым клапаном 13. Нижняя камера сгорания снабжена впускным клапаном 14, выпускным клапаном 15 и свечей зажигания 16. Верхняя камера сгорания также имеет аналогичные устройства 17,18,19. Штампуемая заготовка 21 зажимается между торцом матрицы 8 и кольцевым поршнем 10, для чего в полость 9 подается через канал 20 сжатый воздух.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Камеры сгорания 3 и 4 через впускные клапаны 14 и 17 наполняются топливной смесью. Топливная смесь через каналы 11 поступает также в полость 12. Давление смеси в обеих камерах сгорания одинаковое, поэтому поршень 2 остается неподвижным. Топливная смесь в камере сгорания 3 с помощью свечи 16 поджигается. При сгорании этой смеси давление в камере сгорания 3 увеличивается. Под действием давления продуктов сгорания поршень 2 перемещается вверх, сжимая при этом топливную смесь в камере сгорания 4. При этом топливная смесь из камеры сгорания 4 через отверстия 11 перетекает в полость 12, перемещая клапан 13 вверх. Под действием давления топливной смеси заготовка 21 начинает деформироваться, вследствие чего объем полости 12 увеличивается. Таким образом, по мере перемещения поршня 2 вверх часть топливной смеси вытесняется в полость 12. При этом вследствие нарастания давления топливной смеси заготовка начинает деформироваться.

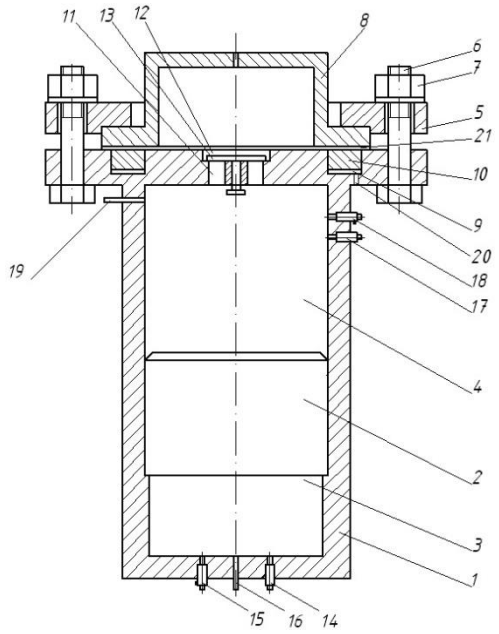


Рисунок 9.1. – Схема двухкамерного устройства для газовой листовой штамповки:
1 – корпус; 2 – поршень; 3, 4 – камеры сгорания; 5 – фланец; 6 – болт; 7 – гайка;
8 – матрица; 9 – кольцевая полость; 10 – кольцевой поршень; 11 – каналы; 12 – полость;
13 –тарельчатый клапан; 14,17 – впускные клапаны; 15,18 – выпускные клапаны;
16,19 – свечи зажигания; 20 – канал; 21 – штампуемая заготовка

Незадолго до достижения поршнем 2 своего крайне – верхнего положения топливная смесь в камере сгорания 4 свечей 19 поджигается. При сгорании топливной смеси давление в камере сгорания 4 резко повышается, что вызывает интенсивное торможение поршня 2. В процессе горения топливная смесь продолжает перетекать из камеры сгорания 4 в полость 12, благодаря этому деформация заготовки 21 увеличивается.

При достижении фронта горения отверстий 11 пламя через эти отверстия проникает в полость 12. Горение топливной смеси вызывает интенсивное повышение давления в полости 12. При этом клапан 13 закрывается, предотвращая перетекание продуктов сгорания из полости 12 в камеру сгорания 4. Под давления продуктов сгорания осуществляется заполнение заготовкой 21 всей полости матрицы 8. Процесс штамповки завершается.

Определим степень повышения давления на поверхности штампуемой заготовки. Рассмотрим вначале горение в нижней камере (рисунок 9.2). Изменение давления в этой камере зависит от изменения доли сгоревшего топлива во времени. Для определения доли сгоревшего топлива применим известное уравнение И. Вибе:

$$\chi = 1 - e^{-6{,}908\left(\frac{t}{t_z}\right)^{m+1}} \qquad (9.1)$$

где t – время; t_z – время полного сгорания топлива; m - показатель характера сгорания.

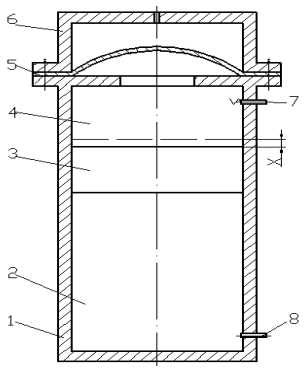


Рисунок 9.2. – Расчетная схема процесса**:** 1 – корпус; 2,4 – камеры сгорания; 3 – поршень; 5 – штампуемая заготовка; 6 – матрица; 7,8 – свечи зажигания

Дифференцируя эту зависимость, найдем выражения для определения изменения доли сгоревшей топливной смеси в единицу времени:

$$\frac{d\chi}{dt} = \frac{6{,}908}{t_z}(m+1)\left(\frac{t}{t_z}\right)^m e^{-6{,}908\left(\frac{t}{t_z}\right)^{m+1}} \tag{9.2}$$

Используя это уравнение, можно определить количество тепла, выделяющегося в единицу времени

$$\frac{dq}{dt} = m_{\Gamma} H_{um} \frac{d\chi}{dt}, \tag{9.3}$$

где q – количество теплоты; m_{Γ} - начальная масса газа в камере сгорания; H_{um} – низшая теплота сгорания 1кг горючего газа.

Запишем уравнение первого закона термодинамики

$$\delta q = du + \delta \ell, \tag{9.4}$$

где δq – элементарное количество теплоты; du – дифференциал внутренней энергии газа; $\delta \ell$ – элементарная работа, совершенная газом.

В газообразной топливной смеси воздух составляет более 90%. Поэтому без большой погрешности топливную смесь можно считать идеальным газом, состояние которого описывается следующим уравнением:

$$PV = RT, \tag{9.5}$$

где P, V – давление и объем газа; T – абсолютная температура газа; R – газовая постоянная. Учитывая, что удельная внутренняя энергия газа

$$u = RT/(\kappa - 1) \tag{9.6}$$

из уравнения (9.4) и (9.5) после преобразований получим:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\kappa - 1}{V_1}\left(\frac{dq}{dt} - \frac{\kappa}{\kappa - 1}\frac{d\ell}{dt}\right), \tag{9.7}$$

где P_1 – давление газа в первой камере; V_1 – объем первой камеры;

κ – показатель адиабаты. Работу ℓ газ совершает, перемещая поршень, поэтому:

$$\frac{d\ell}{dt} = P_1 \frac{dV_1}{dt} = P_1 f \frac{dX}{dt} = P_1 fh \frac{dx}{dt}, \quad (9.8)$$

где f – площадь поперечного сечения поршня; X – ход поршня; x - относительный (безразмерный) ход поршня; h – высота второй камеры.

Полный ход поршня мало отличается от высоты h второй камеры. Поэтому в уравнении (9.8) в качестве характерного размера принята величина h. Текущее значение объема первой камеры зависит от перемещения поршня, поэтому

$$V_1 = V_0 + fX = V_0 + fhx = V_0(1 + \upsilon x), \quad (9.9)$$

$$\upsilon = \frac{fh}{V_0}, \quad (9.10)$$

Учитывая зависимости (9.3), (9.7), (9.9), из уравнения (9.7) получим уравнение, описывающее закон изменения давления в первой камере:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\kappa - 1}{1 + \upsilon x}\left(\frac{m_\Gamma H_{um}}{V_0}\frac{d\chi}{dt} - \frac{\kappa}{\kappa - 1}\frac{P_1 fh}{V_0}\frac{dx}{dt}\right) \quad (9.11)$$

Введем безразмерное давление P_1^* и безразмерное время τ

$$P_1^* = P_1 / P_c, \quad \tau = t/t_z.$$

где P_c _ начальное давление топливной смеси. Безразмерная величина P_1^* характеризует степень повышения давления в первой камере. Используя введенные величины и соотношение (9.10) приведем уравнение (9.2) и (9.11) к безразмерному виду.

$$\frac{dP_1^*}{d\tau} = \frac{\kappa - 1}{1 + \upsilon x}\left(\frac{m_\Gamma H_{um}}{V_0 P_c}\frac{d\chi}{d\tau} - \frac{\kappa}{\kappa - 1}\upsilon P_1^*\frac{dx}{d\tau}\right), \quad (9.12)$$

$$\frac{d\chi}{d\tau} = 6{,}908(m+1)\tau^m e^{-6{,}908\tau^{m+1}}, \quad (9.13)$$

Эти уравнения описывают изменение давления в первой камере в процессе горения топливной смеси в ней. Входящая в (9.12) величина x определяется из уравнения движения поршня

$$\frac{dw}{dt} = \frac{f(P_1 - P_2)}{m_n}, \quad (9.14)$$

$$\frac{dx}{dt} = w, \quad (9.15)$$

Введя безразмерную скорость поршня

$$w^* = \frac{w}{h/t_z}, \tag{9.16}$$

приведем уравнения (9.14) и (9.15) к безразмерному виду

$$\frac{dw^*}{d\tau} = \frac{t_z^2 P_c}{h m_n}\left(P_1^* - P_2^*\right), \tag{9.17}$$

$$\frac{dx}{d\tau} = w^* \tag{9.18}$$

В процессе перемещения поршня топливная смесь во второй камере сжимается. Пренебрегая теплообменом с окружающей средой, этот процесс можно считать адиабатическим. Тогда давление во второй камере описывается следующей зависимостью

$$P_2^* = P_2 / P_c = (1 - x)^{-\kappa} \tag{9.19}$$

где P_c – начальное давление топливной смеси.

Система безразмерных уравнений (9.12), (9.13), (9.17) - (9.19) описывает изменение давления в обеих камерах в период горения топливной смеси в первой камере.

Горение во второй камере устройства для штамповки начинается после подачи искры свечей зажигания 7 (рис. 9.2). В этот период поршень 3 продолжает перемещаться вверх, сжимая топливную смесь во второй камере. Благодаря высокой температуре топливной смеси процесс горения в этой камере происходит значительно интенсивнее, чем в первой камере. Длительность процесса горения составляет порядка 0,01…0,03с. Проведя выкладки аналогичные выше приведенным получены следующие уравнения

$$\frac{dP_2^*}{d\tau} = \frac{1}{\nu(1-x)}\left((\kappa-1)\frac{m_{\Gamma 2} H_{um}}{V_0 P_c}\frac{d\chi_2}{d\tau} + \kappa\nu P_2^*\frac{dx}{d\tau} - \kappa P_2^*\alpha\frac{V_Д}{V_0}\right) \tag{9.20}$$

$$\frac{d\chi_2}{d\tau} = 6{,}908(m_2+1)(\alpha(\tau-\tau_1))^{m_2} e^{-6{,}908(\alpha(\tau-\tau_1))^{m_2+1}} \tag{9.21}$$

$$P_1^* = P_{1\kappa}^*\left(\frac{a}{a+x}\right)^{\frac{1}{\kappa_1}} \tag{9.22}$$

$$P_2^* = P_2 / P_c;\quad \alpha = \frac{t_{z_1}}{t_{z_2}};\quad a = h_1 / h + x_\kappa$$

где t_{z_2} – время сгорания топливной смеси во второй камере; h_1 - начальная высота первой камеры; x_κ – относительны ход поршня к моменту начала горения во второй камере.

Система безразмерных уравнений (9.17), (9.18), (9.20)-(9.22) описывает движение поршня и изменение давление в обеих камерах в период горения топливной смеси во второй камере.

Полученные уравнения решены, используя программу Maple. Расчет произведен для случая использования в качестве топлива метано-воздушной смеси. На рисунке 9.3 представлены графики изменения во времени давления в первой камере, а также скорость и перемещение поршня в период горения топливной смеси в первой камере. Из графика 1 следует, что к концу процесса горения давление топливной смеси во второй камере повышается в 6…6,5 раз. Скорость поршня вначале интенсивно повышается, затем снижается. К концу процесса скорость поршня незначительна.

На рисунках 9.3 и 9.4 представлены графики изменения во времени давления в обеих камерах, а также скорости и перемещения поршня в период горения во второй камере. Из них следует, что поршень вначале перемещается вверх, а затем интенсивно движется вниз. К концу процесса скорость поршня не велика. Из графика 2 видно, что степень повышения давления монотонно увеличивается с 6 до 11. Таким образом, в результате горения топливной смеси в обеих камерах давление во второй камере повышается примерно в 11 раз. Следовательно, во столько же раз повышается давление топливной смеси в полости 12 (рисунок 9.1), примыкающей к штампуемой заготовке. При горении этой смеси давление на поверхности заготовки еще повышается в λ раз. Тогда общая степень повышения давления на поверхности заготовки равно $P_3 = P_2^* \lambda$. В этой зависимости $P_2^* \approx 11$, а λ характеризует степень повышения давления в процессе горения топливной смеси в полости 12, т.е. на поверхности, штампуемой заготовки. Величина λ зависит от формы штампуемой детали и находится в пределах 2…6. Если в процессе штамповки объем заготовки существенно увеличивается, например, при вытяжке, то величина λ равна 4…5. Если же ее объем изменяется незначительно, то $\lambda = 6$.

Таким образом, в данном устройстве давление газа на поверхности штампуемой заготовки в 25…65 раз выше первоначального давления топливной смеси, которое составляет 1…2 МПа. Следовательно, давление газа на поверхности заготовки может достигать 100 МПа и выше. Это дает возможность штамповать широкую номенклатуру деталей.

Двухкамерное устройство для газовой штамповки очень компактно. Фотография устройства представлена на рис. 9.5. На нем была апробирована штамповка сферообразных днищ в цилиндрической матрице диаметром 200 мм. При этом штамповка производилась при очень низком давлении топливной смеси. В частности штамповка днища из стальной заготовки толщиной 1мм была осуществлялась при давлении топливной смеси 0,3 МПа. В данном случае в процессе штамповки объем заготовки сильно увеличивается, поэтому $\lambda = 2$ и общая степень повышения давления составляет порядка 25, что значительно выше, чем в известных устройствах газовой штамповки.

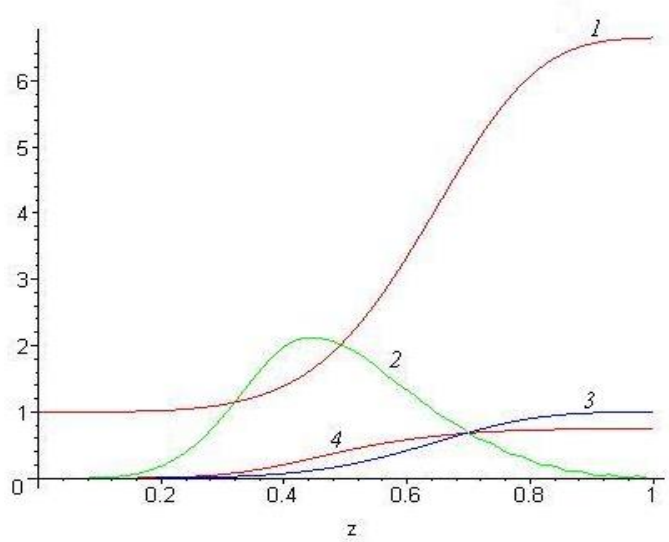


Рисунок 9.3. – Изменение во времени давления в первой камере – 1, скорости поршня – 2, доли сгоревшего топлива 3 и перемещения поршня 4

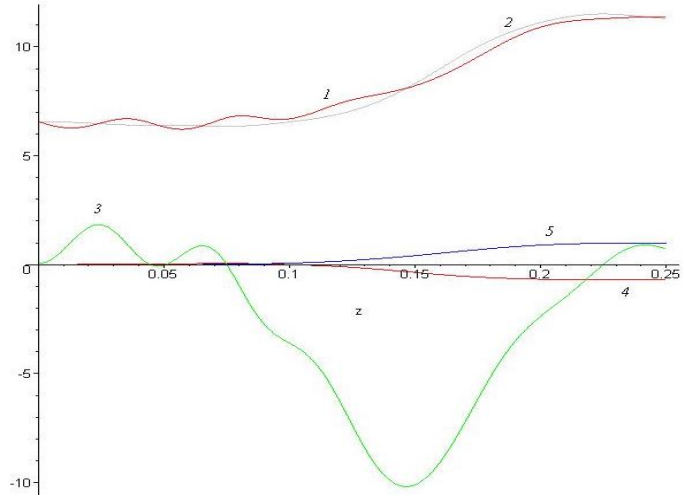


Рисунок 9.4 – Изменение во времени давления в первой и второй камерах – 1,2; скорости – 3; перемещения поршня – 4 и доли сгоревшего топлива 5



Рисунок 9.5 – Двухкамерное устройство для газовой штамповки

Контрольные вопросы

1. Принцип действия двухкамерного устройства для газовой листовой штамповки?
2. Максимальное давление продуктов сгорания?

Список использованной литературы

1. Ильин, Л. Н. Технология листовой штамповки: учеб. для вузов / Л. Н. Ильин, И. Е. Семенов. – М.: Дрофа, 2009. - 475, [5] с.
2. Коликов А. П. Теория обработки металлов давлением: учеб./ А. П. Коликов, Б. А. Романцев. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. - 451 с.
3. Обработка металлов давлением: методические указания сост. Разуваев А. В., Перелыгина Т. И., Соколова Е. А. – Балаково: уч. – изд. л., 2008. – 19 с.
4. Бочаров Ю. А. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Ю. А. Бочаров. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 408 с.
5. Обработка металлов давлением: методические указания сост. Н. М. Кондратьева. А. А. Кондратюк. – Томск: Изд-во Том. гос. архит. строит. ун-та, 2007. – 16 с.
6. Обработка металлов давлением: Методические указания сост. Барчуков Д.А., Беляков А.В. – Тверь: Издательство ТГТУ. Тверской государственный технический университет, 2005. – 12 с.
7. Брылеев В. Н. Волчков А. Н. и др., Обработка металлов давлением: Сборник лабораторных работ с методическими указаниями по курсу «Технология конструкционных материалов» для студентов всех специальностей МАМИ, 2004. с. 42
8. Изучение операций листовой штамповки: Методические указания к лабораторной работе по технологии конструкционных материалов / Сост.: В. В. Акимов, М. С. Корытов, А. Ф. Мишуров. – Омск:СибАДИ, 2012. – 16 с.

МАЛСУГЕНОВ Роман Сергеевич

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Учебно-методическое пособие
для аспирантов обучающихся по направлению подготовки
2.5.7 Технологии и машины обработки давлением

Корректор Чагова О. Х.
Редактор Чагова О. Х.

Сдано в набор 24.04.2026 г.
Формат 60х84/16
Бумага офсетная.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,02
Заказ № 5314
Тираж 100 экз.

Оригинал-макет подготовлен
В Библиотечно-издательском центре СКГА
369000, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36