МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

В.А. ГЛУЩЕНКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Рекомендовано редакционно-издательским советом
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования «Самарский
государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)»
в качестве учебника для студентов, обучающихся по программе высшего
профессионального образования по специальности
«Машины и технология обработки металлов давлением»

САМАРА
Издательство СГАУ
2013

УДК 621.73(075)
ББК 34.123я7
Г 555

Рецензенты: начальник КБ отдела 612 ФГУП «ГНПРКЦ»
«ЦСКБ–Прогресс» С. С. Б о р о в о й;
д-р тех. наук, профессор кафедры производства
двигателей летательных аппаратов Г. В. С м и р н о в

Глущенков, В.А.
Г555 **Технология и оборудование специальных видов листовой штамповки**: учеб. / *В.А. Глущенков*. – Самара: Изд-во СГАУ, 2013. – 174 с.

ISBN 978-5-7883-0930-9

В учебнике дано определение специальным видам листовой штамповки, на конкретных примерах показано их многообразие. Предложен классификатор специальных методов штамповки.

Первая часть учебника посвящена штамповке эластичными средами. Рассмотрены разделительные, формообразующие процессы при получении деталей из листовых и полых заготовок, прессованных профилей, применяемое технологическое оснащение и оборудование. Даны примеры расчета и проектирования.

Далее изложены физические основы динамических методов деформирования: взрывной, электрогидравлической и магнитно-импульсной обработки. Рассмотрены свойства металлов при высокоскоростном деформировании.

По каждому из импульсных методов приведены технологические схемы, основы проектирования технологий, применяемая оснастка и оборудование.

Издание широко иллюстрировано примерами изготавливаемых деталей.

Представленные в учебнике материалы являются частью лекционного курса по специальным видам листовой штамповки, читаемого автором студентам инженерно-технологического факультета.

УДК 621.73(075)
ББК 34.123я7

ISBN 978-5-7883-0930-9

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ 7
2. ШТАМПОВКА ЭЛАСТИЧНЫМИ СРЕДАМИ 16
2.1. Технологические схемы штамповки эластичными средами 16
2.2. Свойства эластичных сред 20
2.3. Разделительные операции, осуществляемые с использованием эластичных сред 24
2.3.1. Основы проектирования технологического процесса резки с использованием эластичной среды 27
2.3.2. Детали, полученные резкой эластичными средами. Технологические возможности 28
2.3.3. Эффективность процессов резки эластичными средами. Область рационального применения технологии 29
2.3.4. Проектирование процесса вырубки-пробивки эластичной средой при изготовлении конкретной типовой детали 31
2.3.5. Пример расчета 38
2.3.6. Задания для контрольной работы 40
2.4. Формообразующие операции, осуществляемые эластичными средами 46
2.4.1. Гибка, гибка-формовка 46
2.4.1.1. Проектирование процесса гибки эластичной средой при изготовлении типовой детали 53
2.4.1.2. Пример расчета 57
2.4.2. Рельефная формовка 59
2.4.3. Вытяжка эластичной средой 61
2.4.4. Формовка полых заготовок 64
2.4.5. Гибка-формовка прессованных профилей 65
2.5. Контейнеры для штамповки эластичными средами 68
2.6. Оборудование, применяемое при штамповке эластичными средами 70

3. ПРОЦЕССЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ 73
4. ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ 75
5. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ 80
6. ВЗРЫВНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ 88
6.1. Определение, виды и характеристики взрывчатых веществ 88
6.2. Давления, развиваемые при взрыве 89
6.3. Технологические схемы взрывной обработки 92
6.4. Примеры использования энергии взрыва в промышленности 98
6.4.1. Листоштамповочное производство 98
6.4.2. Упрочнение взрывом 100
6.4.3. Взрывная резка металлов 101
6.4.4. Прессование порошков 103
6.4.5. Огневой способ зачистки заусенцев. Пример использования газообразных ВВ 104
6.4.6. Взрывное удаление обломков инструмента из деталей ответственных изделий 105
6.4.7. Сварка взрывом 106
7. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ 109
7.1. Физические основы электрогидравлического эффекта 109
7.2. Технологические схемы электрогидроимпульсной обработки 112
7.3. Электродные системы для электрогидроимпульсной обработки 113
7.4. Конструктивно-технологические параметры эффективности электрогидравлического воздействия на обрабатываемый объект 116
7.5. Примеры технологического применения электрогидравлического эффекта 117
7.5.1. Листоштамповочное производство 117
7.5.2. Электрогидравлическая развальцовка труб 119
7.5.3. Упрочнение металла водно-воздушными струями 121
7.5.4. Электрогидравлическая очистка литья 123
7.5.5. Разрушение бетонных блоков 125
8. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ (МИОМ) .. 126

8.1. Физика процесса 126
8.2. Повышение технологической пластичности металла при магнитно-импульсном нагружении 133
8.3. Технологические схемы МИОМ 137
8.4. Индукторные системы для магнитно-импульсной обработки 139
8.5. Примеры технологического применения импульсных магнитных полей в листовой штамповке 142
8.5.1. Разделительные операции для полых заготовок 142
8.5.2. Формообразующие магнитно-импульсные операции 148
8.5.3. Магнитно-импульсная калибровка 151
8.5.4. Магнитно-импульсная сборка 151
8.5.5. Реализация процессов МИОМ 155
8.6. Расчёт потребной энергии формообразования при динамических методах деформирования 158
ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ВЫВОДЫ 162
КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ по определению потребной энергии динамического формообразования 164
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 168
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 170

ВВЕДЕНИЕ

Постоянно повышающиеся требования к качеству готовых деталей, минимизации энерго- и материальных затрат, сокращению сроков подготовки производства при освоении новой продукции являются причиной неудовлетворенности существующими методами листовой штамповки.

Для специалистов в области листовой штамповки открывается необъятное поле творческой деятельности по совершенствованию существующих или разработке новых методов листовой штамповки.

В процессе решения задач по устранению тех или иных недостатков, обеспечению особых требований к готовой продукции или повышению экономической эффективности процессов специалистами создаются новые методы листовой штамповки.

Одни задачи решены, но технический прогресс ставит новые.

Каждый из рождающихся методов является результатом решения конкретной специальной задачи, поэтому их условно называют «специальными» [11].

Набор специальных технологий листовой штамповки, знание их возможностей и рациональных областей применения позволяет поднять «технологическую вооруженность» предприятия. Особенно это ценно там, где необходимо в сжатые сроки освоить и испытать новые изделия, организовать производство с минимальными энерго- и материальными затратами.

В представляемом материале в первую очередь изложены основы штамповки эластичной средой. Рассмотрены разделительные, формообразующие процессы при получении деталей из листовых и полых заготовок, прессованных профилей, применяемое технологическое оснащение и оборудование.

В 50–60 годы прошлого века возникли новые высокоэнергетические (динамические, высокоскоростные, импульсные) методы обработки. Это такие методы обработки, как взрывная, электрогидравлическая и магнитно-импульсная. Параметры импульсного воздействия меняют механические и технологические свойства металлов, характер деформирования (возникают волновые эффекты), требуют особенного подхода к расчету режимов обработки и построению (проектированию) технологических процессов.

Данный учебник дает студентам исходные сведения о физике и особенностях специальных процессов и, главное, об их технологическом применении: разделительных операциях, формовке, вытяжке, сборке, сварке и др. Большое внимание уделено описанию использования специализированного оборудования и технологического оснащения, применяемых для реализации новых технологий.

Представленный материал широко иллюстрирован примерами производственного использования специальных технологий, фотографиями изготовленных деталей.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Наибольшее распространение в машиностроении получили инструментальные методы листовой штамповки, то есть технологические процессы, реализуемые с помощью инструментальных штампов. Это, в основном, операции вырубки-пробивки, вытяжки, гибки и формовки [1,2].

Конструкции применяемых при этом штампов зависят от формы и размеров детали, вида заготовки (карточка, полоса, лента), степени механизации и автоматизации процессов (программы выпуска деталей).

По конструктивному признаку инструментальные штампы подразделяются на специальные, специализированные и универсальные. Специальные штампы предназначены для изготовления конкретной детали (сколько деталей, столько и штампов); специализированные – для выполнения одной операции, при этом детали могут быть разными. Например, гибочные штампы (станки) с программным управлением. Операция одна – гибка, а детали разные. Универсальные штампы позволяют с помощью сменных рабочих блоков осуществлять различные операции и получать различные детали.

Проектирование основных технологических процессов инструментальных методов листовой штамповки было предметом изучения в предыдущем семестре. Это так называемые «традиционные» инструментальные методы листовой штамповки.

К сожалению, идеальных методов листовой штамповки, как и штампов для их реализации, не существует.

Основные их недостатки:

- не обеспечивают требуемого качества готовых деталей (точность геометрии, чистота поверхности, механические свойства...);
- сопровождаются повышенным расходом металла;
- требуют сложных по конструкции и металлоемких штампов;
- не удовлетворяют по производительности;
- сопровождаются повышенными энергозатратами;
- слишком велики сроки подготовки производства.

Постоянно повышающиеся требования к качеству готовых деталей, минимизации энерго- и материальных затрат, сокращению сроков подготовки производства при освоении новой продукции являются причиной неудовлетворенности существующими методами листовой штамповки.

Для специалистов в области листовой штамповки открывается необъятное поле творческой деятельности по совершенствованию существующих или разработке новых методов листовой штамповки.

В подтверждение сказанного могут служить публикации в специальной технической литературе, например в журнале «Кузнечно-штамповочное производство» или в одноименном реферативном журнале, где ежемесячно

представлена информация о новых (от 30 до 70) методах штамповки или конструкциях штампов, соответствующих уровню изобретения.

Таким образом, каждый месяц разрабатывается до нескольких десятков новых методов листовой штамповки, штампов для их реализации.

Это свидетельствует, во-первых, о значимости и распространенности процессов листовой штамповки в машиностроении, а во-вторых, как было сказано, о неудовлетворенности существующими методами и средствами штамповки, о необходимости их совершенствования.

В качестве примера рассмотрим техническую задачу резки тонкостенной трубы на мерные длины (заготовки) (рис.1).

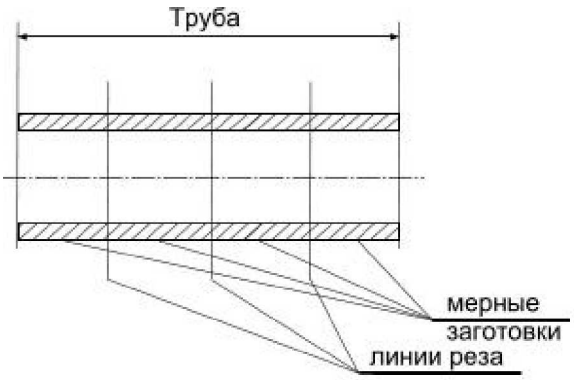


Рис. 1. Резка труб на мерные длины

Для осуществления этой операции можно воспользоваться механической обработкой, листовой штамповкой, использовать лазерную и другие технологии.

Наиболее перспективной с точки зрения, например, производительности является резка в инструментальных штампах, где пуансон в начальный момент «протыкает» отверстие, а затем осуществляет резку до полного разделения (рис.2). В качестве основных недостатков этого метода являются отход металла, возможное смятие трубы, сложность штампа [3].

Для Южнокорейской фирмы “LG”, где при производстве СВЧ-печей используется в качестве излучателя короткая медная втулка, проблема уменьшения отхода при разрезке трубы на мерные длины является весьма актуальной. При существующей программе выпуска микроволновых печей в отход уходит несколько километров дорогостоящей медной трубы.

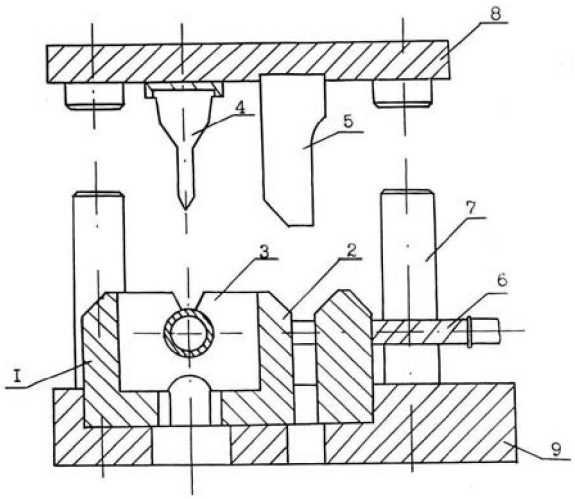


Рис. 2. Штамп для резки труб на мерные длины:
1 – неподвижная державка матрицы; 2 – подвижная державка матрицы; 3 – съемные матрицы; 4 – пуансон; 5 – клин; 6 – тяга с пружинами; 7 – направляющие колонки; 8 – верхняя плита; 9 – нижняя плита

Задача уменьшения отхода направила инженерную мысль на создание безотходных методов резки. В результате разработаны новые специальные методы резки труб сдвигом и кручением (рис.3) [4-6]. С помощью этих методов резки поставленная цель достигнута – отход ликвидирован. Но осталась нерешенной проблема, например, устойчивости (смятия) трубы, возрастающая с уменьшением ее относительной толщины.

В обоих этих методах труба 3 зажимается в полуматрицах 1 и 2. Далее, в первом случае осуществляют сдвиг полуматриц с закрепленной в них трубой относительно друг друга. Во втором – одна полуматрица 2 закреплена неподвижно, а другой сообщается вращательное движение.

В атомной промышленности применяются трубы из нержавеющей стали с толщиной стенки 0,05 мм при диаметре 30 мм ($s/d \approx 0{,}002$). Такую трубу даже закрепить в оснастке проблема, а все существующие методы резки приводят к искажению ее геометрии, смятию.

Сочетание требований и по безотходности резки, и по обеспечению высокого качества отрезанной трубы (без потери устойчивости) привело к разработке еще одного нового метода резки – резки кручением с активным противодавлением, например, эластичной средой (рис. 4) [7,8].

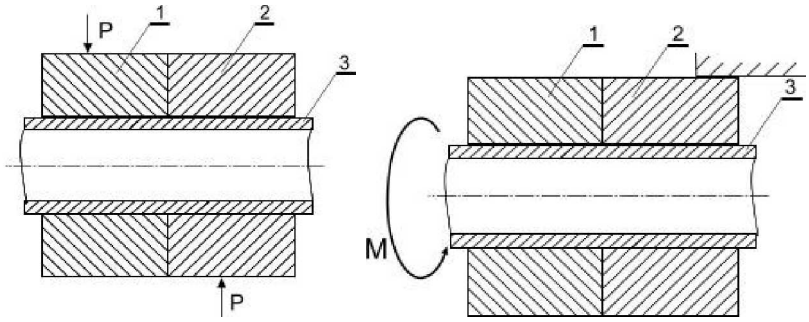


Рис. 3. Схемы резки труб сдвигом и кручением:
1, 2 – матрица; 3 – заготовка

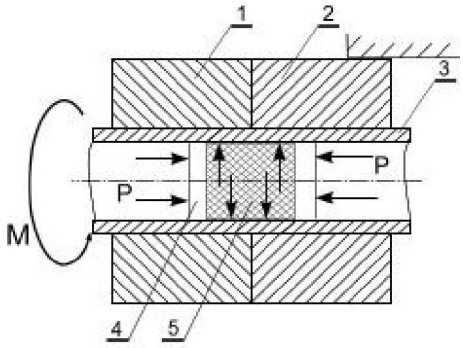


Рис. 4. Схема резки труб кручением с активным противодавлением:
1,2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – толкатель; 5 – эластичная среда

В этом методе сжатием эластичной среды 5 внутри трубы ее стенка прижимается к полуматрицам 1 и 2, что предотвращает потерю устойчивости трубы при дальнейшей резке ее кручением.

Еще пример. В конструкциях современных изделий, в том числе в ракетной технике, используются гофрированные тоннельные трубопроводы (рис.5).

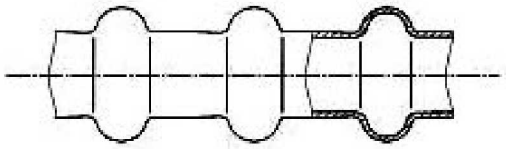


Рис. 5. Тоннельный трубопровод

Наиболее распространенная технология их изготовления: штамповка из листовых заготовок двух половин с последующей подгонкой и сваркой по криволинейной поверхности (рис.6) [9].

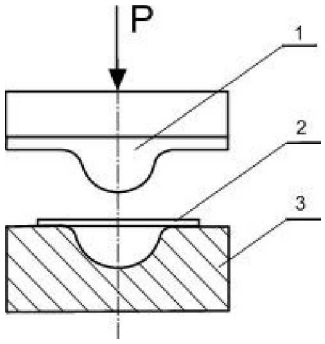


Рис. 6. Схема штамповки тоннельного трубопровода
из листовой заготовки в инструментальном штампе:
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица

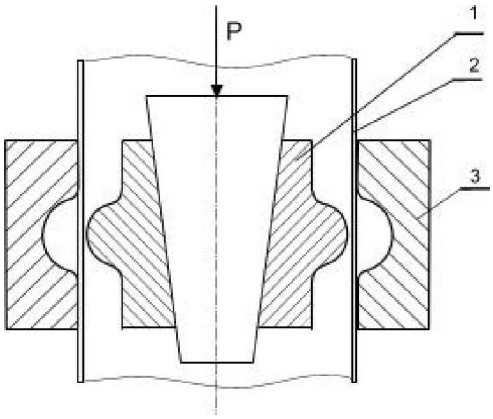


Рис. 7. Схема штамповки тоннельного трубопровода
из полой заготовки секционными пуансонами:
1- раздвижные секции пуансона; 2 – трубчатая заготовка; 3 – матрица

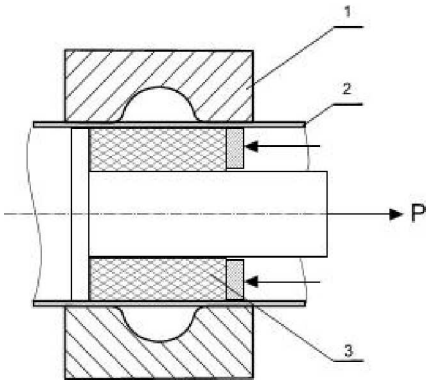


Рис. 8. Схема штамповки тоннельного трубопровода из полой заготовки с использованием эластичной среды:
1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – эластичная среда

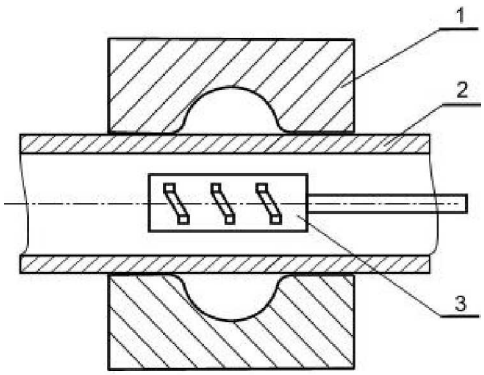


Рис. 9. Схема штамповки тоннельного трубопровода из полой заготовки импульсным магнитным полем:
1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – индуктор

Эта технология весьма трудоемка (раскрой на карточки, штамповка, обрезка припуска, подгонка, сварка, калибровка), сопровождается большим отходом металла. А наличие большой протяженности сварных швов – как потенциальный источник дефектов – приводит к дополнительным операциям контроля и испытания. Как результат повышения технико-экономической эффективности процессов изготовления гофрированных труб разработаны новые методы штамповки таких трубопроводов из цельнотянутых труб: раздача их секционными пуансонами (рис. 7), штамповка эластичными средами (рис.8), импульсным магнитным полем (рис. 9).

На рис. 10 приведены различные способы выполнения одной и той же операции – отбортовки отверстий, созданные в процессе творческой деятельности специалистов [10].

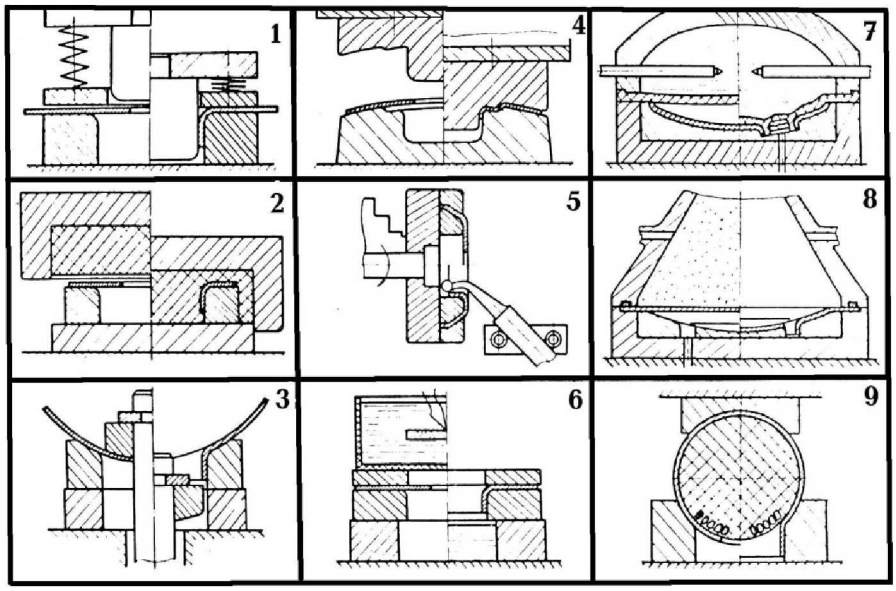


Рис. 10. Способы отбортовки отверстий:
1 – в инструментальных штампах; 2 – эластичной средой; 3 – протяжными устройствами; 4 – на листоштамповочных молотах; 5 – токарно-давильной операцией; 6 – взрывом; 7 – электрогидроимпульсной штамповкой; 8 – газовой детонационной штамповкой; 9 – магнитно-импульсной штамповкой

В процессе решения задач по устранению тех или иных недостатков, обеспечению особых требований к готовой продукции или повышению экономической эффективности процессов специалистами создаются новые методы листовой штамповки. В рассмотренных примерах разработаны новые методы резки, формовки и отбортовки.

Одни задачи решены, но технический прогресс ставит новые. Например, для последующей автоматической сварки отрезанных труб необходимо, чтобы зона трубы, прилегающая к линии реза, была на длине не менее 10 мм откалибрована с высокой точностью, а высокое качество сварки предъявляет повышенные требования к геометрии поверхности разделения. А это, в свою очередь, влечет за собой разработку новых методов листовой штамповки и т.д. И процесс этот бесконечен.

Каждый из рождающихся новых методов является результатом решения конкретной специальной задачи, поэтому их условно называют «специальными» [11].

Набор специальных технологий листовой штамповки, знание их возможностей и рациональных областей применения позволяют поднять «технологическую вооруженность» предприятия. Особенно это ценно там, где необходимо в сжатые сроки освоить и испытать новые изделия, организовать производство с минимальными энерго- и материальными затратами.

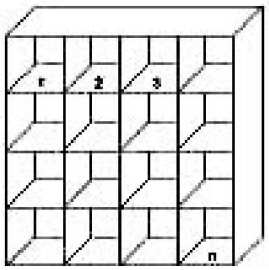


Рис. 11. Набор технологий листовой штамповки

Представьте себе стенку с множеством ячеек, в каждой из которых «лежит» определенная специальная технология (рис.11). В соответствии с поставленной задачей специалист должен проанализировать возможность использования для ее решения имеющиеся в ячейках технологии, выбрать наиболее рациональную. А при ее отсутствии приступить к разработке нового технического решения, которое, в случае удачи, займет в стенке новую ячейку.

Данный курс лекций посвящен изучению существующих специальных видов листовой штамповки, их анализу и методологии разработки (создания) новых методов и средств их реализации: оборудования, оснастки.

В основу классификации специальных видов листовой штамповки можно положить следующие наиболее значимые признаки:

1. Нетрадиционные источники нагружения: энергия взрыва, импульсное магнитное поле, высоковольтный разряд в жидкости, силопривод из материалов с «памятью формы», штамповка льдом и другие.

2. Вид среды, передающей усилие на деформируемую заготовку: эластичная среда, жидкость, газ, магнитное поле. Соответственно, специальные виды листовой штамповки: штамповка эластичными средами, гидроформовка, газодетонационная штамповка, магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ).

3. Температурно-скоростные режимы деформирования, параметры внешнего воздействия. К ним относятся: температура Т, при которой осуществляется деформирование, скорость деформирования V и деформации

$\dot{\varepsilon}$, время деформирования τ и другие. Соответственно, специальные виды листовой штамповки: статические и динамические методы штамповки, штамповка в условиях сверхпластичности, изометрическая штамповка, методы штамповки, использующие эффект электропластичности и др.

4. Вид заготовки (полуфабриката) объединяет вокруг себя такие специальные виды листовой штамповки, как, например, штамповка деталей из труб, прессованных профилей, обшивок различной кривизны и другие.

5. Специальные виды, повышающие предельные возможности процессов и обеспечивающие требуемую (заданную) геометрию готовых изделий. Это, например, методы штамповки без утонения, с набором толщины, стесненный изгиб, вытяжка с пульсирующим прижимом, давильно-раскатные работы, методы, совмещающие статическое и динамическое нагружение и т.д.

6. Специальные виды листовой штамповки, учитывающие особенности штампуемого материала (физико-механические, технологические свойства): штамповка неметаллических материалов, штамповка композиционных материалов на металлической и неметаллической основе, штамповка жидкого металла.



Рис. 12. Классификация специальных видов листовой штамповки

Приведенная классификация (рис.12) не претендует на полный охват всех специальных видов листовой штамповки, однако позволяет провести некоторую их систематизацию и выбрать типовых представителей для дальнейшего изучения.

2. ШТАМПОВКА ЭЛАСТИЧНЫМИ СРЕДАМИ

2.1. Технологические схемы штамповки эластичными средами

Рассмотрим одну из технологических схем процесса штамповки эластичными средами – «штамповку в закрытом объеме» (рис.13) [9,12-15].

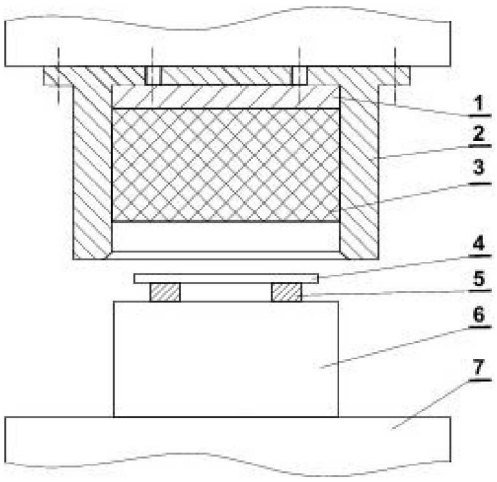


Рис. 13. Схема штамповки с закрытым объемом эластичной среды:
1 – верхняя плита; 2 – контейнер; 3 – эластичная среда; 4 – заготовка;
5 – инструмент; 6 – подштамповая плита; 7 – нижний стол пресса

К верхней плите 1 гидравлического пресса крепится контейнер 2 с размещенной внутри него эластичной средой 3 (эластичный блок), например, резиной или полиуретаном.

На нижнем столе пресса 7 размещается подштамповая плита 6, на которой располагаются соответствующие инструмент 5 и заготовка 4.

Для осуществления операции вырубки-пробивки инструментом является «вырезной шаблон», повторяющий контур готовой детали, при гибке, рельефной формовке – «формблок».

Внутренний диаметр контейнера равен наружному диаметру подштамповой плиты.

При ходе ползуна пресса подштамповая плита 6 входит в рабочее пространство контейнера 2. Эластичный блок 3 (подушка) оказывается в замкнутом (закрытом) объеме.

Резина, полиуретан, как и жидкость, практически несжимаемы. Поэтому, оказавшись в замкнутом объеме, эластичная среда передает силовое деформирующее воздействие на заготовку.

На рис. 14 приведена схема штамповки эластичной средой в исходном, промежуточном и конечном положениях.



Рис. 14. Схема штамповки в начальном (а), промежуточном (б) и конечном положениях (в)

Заготовкой в приведенной схеме служит прямоугольная карточка, а получаемая деталь – кольцевая уплотнительная прокладка.

Размеры карточки больше размеров детали, то есть по сравнению с деталью карточка имеет «припуск». Под действием начального давления эластичная среда (подушка) прижимает заготовку к вырезному шаблону, затем деформирует отход. При увеличении давления в контейнере происходит отделение металла отхода по острой кромке вырезного шаблона. После обратного хода пресса деталь снимается с инструмента, с подштамповой плиты удаляется отход.

Отличительной особенностью штамповки эластичными средами является универсальность верхней половины штампа-контейнера.

Меняя вырезные шаблоны (в пределах, конечно, размеров контейнера) можно в одном и том же контейнере получать различные детали (рис.15); сменив вырезной шаблон на формблок, можно получать различные детали и за счет смены операции (рис. 16): гибка, рельефная формовка.

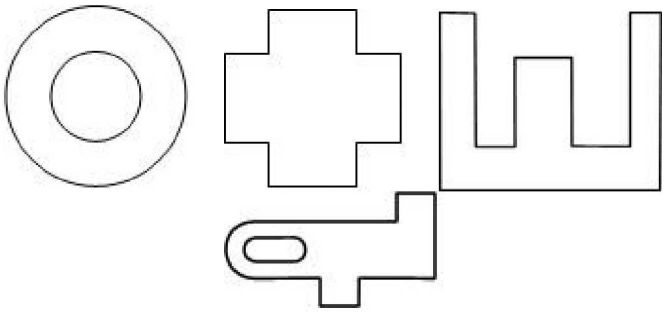


Рис. 15. Примеры деталей, изготовленных с помощью операций вырубки-пробивки эластичной средой

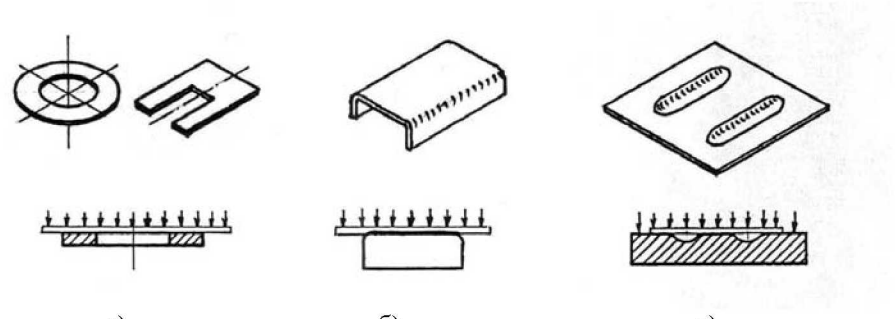


Рис. 16. Операции, осуществляемые с помощью эластичных сред в одном и том же контейнере: а) вырубка-пробивка; б) гибка; в) рельефная формовка

Возможна закрытая схема штамповки с установкой контейнера на нижней плите пресса, что определяется удобством работы, требуемой точностью взаимного позиционирования контейнера, инструмента, заготовки (рис.17).

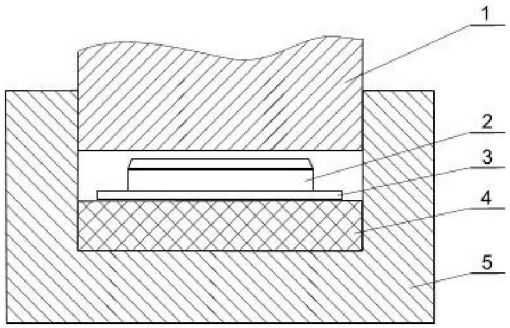
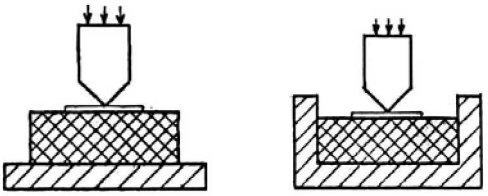


Рис. 17. Расположение контейнера на нижней плите пресса:
1 – подштамповая плита (боек); 2 – вырезной шаблон;
3 – заготовка; 4 – эластичная подушка; 5 – контейнер

Кроме рассмотренной технологической схемы штамповки в закрытом объеме используются также «открытая» и «полуоткрытая» технологические схемы.

«Открытая» технологическая схема самая простая и дешевая, так как при ее использовании не требуется контейнер. Однако при силовом воздействии на эластичную среду, последняя имеет возможность (рис. 18 а) «растекаться» во все стороны, что не обеспечивает больших значений деформирующих

усилий. Вот почему эта схема, хотя и редко, но используется при выполнении операций гибки, не требующих больших усилий.



а) б)

Рис. 18. Открытая (а), полуоткрытая
(б) схемы штамповки эластичной средой

Повысить деформирующее усилие можно, создав препятствие для растекания эластичным средам в одном из направлений. Такая схема носит название «полуоткрытой» (рис. 18 б). При таких схемах можно кроме гибки осуществить и вырубку-пробивку или формовку, но, к сожалению, при получении деталей из очень тонколистовых заготовок.

Существует также «бесконтейнерная – закрытая» (рис. 19) технологическая схема, где в качестве контейнера используется заготовка, например, трубчатая. При сжатии эластичной среды внутри трубы развиваемые давления приводят к ее деформированию.

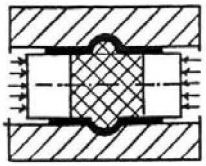


Рис. 19. Бесконтейнерная – закрытая технологическая схема
штамповки эластичной средой

Следует заметить, что для этой схемы пропадает такое положительное качество штамповки эластичными средами, как универсальность одной из половин штампа. Каждая труба будет требовать по размерам своего резинового блока. Однако схема находит применение благодаря простоте оснастки по сравнению с инструментальным штампом.

Таким образом, в промышленности нашли применение следующие технологические схемы листовой штамповки эластичными средами, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки:

- штамповка в контейнерах с закрытым объемом;
- бесконтейнерная открытая и полуоткрытая технологические схемы;
- бесконтейнерная закрытая схема штамповки.

Приведенные технологические схемы осуществляются не только при возвратно-поступательном движении рабочих органов пресса. В последние годы предложен и ряд новых технологических схем, реализующих, например, вращательное движение оснастки.

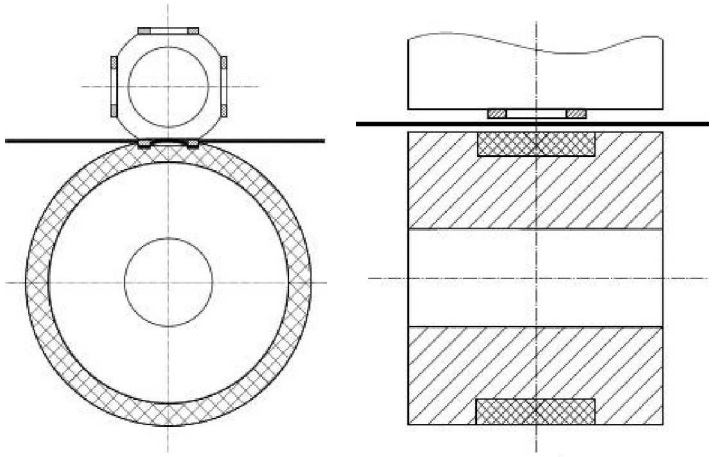


Рис. 20. Технологическая схема вырубки-пробивки прокаткой:
а) открытая; б) полуоткрытая

Представьте два валка, один из которых облицован эластичной средой, а на другом закреплен инструмент. При прокатке ленты между валками, обеспечивающими заданное сжатие эластичной среды, осуществляется, например, вырубка-пробивка (рис. 20 а). Эластичная среда в этой схеме имеет возможность «растекания» как в осевом, так и в окружном (тангенциальном) направлении, то есть реализуется «открытая» схема штамповки прокаткой. Валки могут быть спрофилированы, как это показано на рис. 20 б, что препятствует осевому растеканию эластичной среды – полуоткрытая схема штамповки.

При вхождении в зацепление выступов и впадин на вращающихся валках может быть реализована закрытая контейнерная технологическая схема.

2.2. Свойства эластичных сред

В качестве эластичных сред применяются резины и полиуретаны различных марок, отличающиеся друг от друга по своим свойствам. Полиуретан – синтетический резиноподобный материал (синтетический каучук) – получают на основе сложных полимеров эфира, прочность которого в 6-8 раз выше прочности резины. Из всех свойств эластичных сред рассмотрим те, которые необходимы для обоснованного выбора эластичной

среды применительно к той или иной операции листовой штамповки. Это – твердость по Шору, относительное удлинение δ, остаточная деформация $\varepsilon_{ост}$ и предельная нагрузка (давление) р. В таблице 1 в качестве примера приведены для сравнения механические свойства резин марок 56 и 3826 и полиуретанов СКУ-7Л и СКУ-ПФЛ.

Таблица 1. Физико-механические свойства эластичных сред

Марка эластичной среды	Механические свойства эластичной среды			
	Твердость по Шору	Относительное удлинение δ, %	Остаточная деформация $\varepsilon_{ост}$,%	Предельное давление р, кг/см^2
Резина марки 56	55	450	28	500
Резина марки 3826	70	300	20	500
Полиуретан СКУ-7Л	80	600	3	1000
Полиуретан СКУ-ПФЛ	92	400	10	1000

Одной из главных характеристик эластичной среды является ее твердость. Твердость резины определяется по высоте отскока стандартного бойка от эластичного блока.

Как видно из таблицы 1, твердость различных марок резин колеблется от 35 до 75 единиц, а твердость полиуретанов доходит до 92 единиц.

Твердость эластичных сред определяет эффективность, а в некоторых случаях и возможность осуществления той или иной штамповочной операции.

Рассмотрим для примера процесс гибки коротких жестких бортов в контейнере с закрытым объемом.

Если использовать мягкую резину, то в процессе гибки она обтекает жесткий борт и в конечном счете создает противодавление, препятствующее осуществлению процесса гибки, какое бы возрастающее давление ни было бы приложено к заготовке (рис.21).

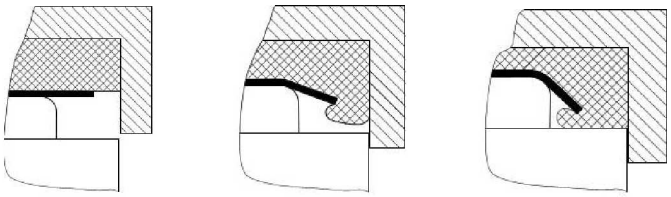


Рис. 21. Схема гибки коротких жестких бортов
с использованием «мягких» резин

При использовании же резины с высокой твердостью такого явления не наблюдается, так как сопротивление деформированию борта становится меньше сопротивления течения эластичной среды.

Следовательно, для выполнения операции гибки коротких жестких бортов предпочтительнее использовать эластичную среду с высокой твердостью.

Вторым важным свойством является такая характеристика эластичной среды, как относительное удлинение δ %. Она определяет возможность удлинения волокон эластичной среды без разрушения $\delta = (L_k - L_o)/L_o$ (рис.22).



Рис. 22. Удлинение волокон эластичной среды в процессе штамповки

Естественно, что чем выше значение δ, тем более предпочтителен выбор этой марки эластичной среды.

Величина остаточной деформации – определяет размеры эластичного блока после снятия нагрузки. Если эластичный блок в виде цилиндра высотой h_0, нагрузить до конечного размера h_k,то после снятия нагрузки эластичный блок (цилиндр) не вернется в исходное состояние с высотой h_0 (рис. 23), а примет значение $h < h_0$: величина «$h_0 - h$» и характеризует остаточную деформацию:

$$\varepsilon_{ост} = \frac{h_0 - h}{h_0}$$

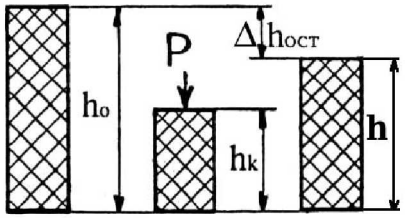


Рис. 23. Остаточная деформация Δh эластичного блока

Со всех позиций желательно, чтобы эта величина была минимальной. Остаточная деформация эластичного блока в контейнере приведет к тому, что блок окажется запрессованным в контейнере с большей величиной натяга по сравнению с исходным значением. Вот почему для его выпрессовки в случае замены изношенного на новый в конструкции контейнера предусмотрена выпрессовочная прокладка, усилие на которую передается через специальные отверстия в дне контейнера (см. рис. 13).

Особое значение величина остаточной деформации имеет при использовании бесконтейнерной закрытой технологической схемы штамповки эластичной средой. Остаточная деформация в этом случае может привести к проблеме извлечения эластичного блока из отформованной заготовки (рис.24).

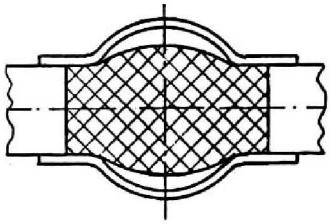


Рис. 24. Конечное положение эластичного блока после снятия нагрузки

Предельная нагрузка, которую выдерживает эластичная среда, определяется максимальным давлением p на заготовку при штамповке. При превышении предельной нагрузки внутренние молекулярные связи эластичной среды разрываются. Блок теряет эластичность, охрупчивается и рассыпается на отдельные гранулы. Эластичный блок выходит из строя.

Невысокие значения предельной нагрузки для резины p=500 кг/см^2 нередко приводят к недоштамповке деталей и применению в дальнейшем большого объема ручных доводочных работ. Полиуретаны выдерживают давление до 1000 кг/см^2. Повышение предельного давления вдвое по сравнению с резинами определило предпочтительное их применение при штамповке эластичными средами. Использование полиуретанов позволило резко сократить объем ручных доводочных работ.

Да и по остальным показателям выбор полиуретанов, с технической точки зрения, например, марки СКУ-7Л предпочтителен.

Однако следует не забывать об относительно высокой стоимости (в 2-3 раза) полиуретанов по сравнению с резиной. Для защиты полиуретанов от повреждения в некоторых случаях применяют составные эластичные блоки. Основная его часть из полиуретана, а рабочая поверхность облицована относительно тонким слоем резины. В процессе эксплуатации изношенные резиновые накладки заменяются на новые, но зато полиуретановый блок остается неповрежденным.

2.3. Разделительные операции, осуществляемые с использованием эластичных сред

Вырубка-пробивка листовых деталей осуществляется в контейнерах с закрытым объемом. Вырезной шаблон, имеющий форму детали, устанавливается на подштамповую плиту. На шаблоне размещают заготовку с припуском на обрезку. При рабочем ходе ползуна пресса контейнер с эластичной подушкой опускается вниз. После захода подштамповой плиты в рабочее пространство контейнера эластичная среда сначала прижимает заготовку к вырезному шаблону, затем по мере возрастания давления происходит отгиб припуска по режущей кромке шаблона. Дальнейшее увеличение давления приводит к образованию трещины со стороны режущей кромки шаблона.

Если величина припуска будет меньше высоты вырезного шаблона (L<H), то припуск полностью загнется вокруг режущей кромки и даже образовавшаяся трещина может не привести к отделению отхода – не хватит давления (рис. 25). Это случай короткого припуска. Чтобы произошло отделение (сдвиг) отхода потребуются давления значительно большие тех, которые выдерживает полиуретан (10 кг/мм^2).

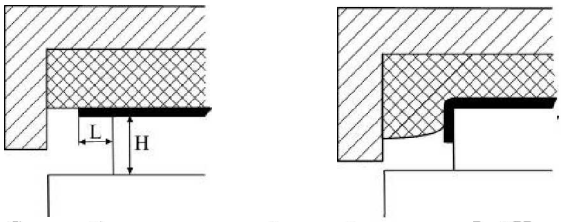


Рис. 25. Схема обрезки эластичной средой короткого L < H припуска

Если величина припуска будет значительно больше высоты вырезного шаблона (L>H), то припуск (отход) также сначала отгибается вокруг режущей кромки до соприкосновения длинного отхода с подштамповой плитой (рис. 26а). Увеличивающееся давление защемляет припуск между эластичным блоком и подштамповой плитой (рис.26б). Возникающие в этом случае силы трения $\tau_{тр}$ между припуском и подштамповой плитой не дают возможности отходу подтягиваться к вырезному шаблону. Припуск оказывается как бы защемленным между режущей кромкой и той его частью, которая прижата к подштамповой плите.

Продолжающееся действие давления эластичной среды на наклонный свободный участок приводит к возникновению растягивающих напряжений (прогиб отхода между двумя защемленными точками увеличивает его длину за счет растяжения). Растягивающие напряжения в очаге деформаций совместно со сдвиговыми и при наличии надреза по острой кромке приводят к значительному снижению потребного давления разделения (менее 10 кг/мм^2).

Причем величина этого давления будет тем меньше, чем вьше значения растягивающих напряжений на режущей кромке.

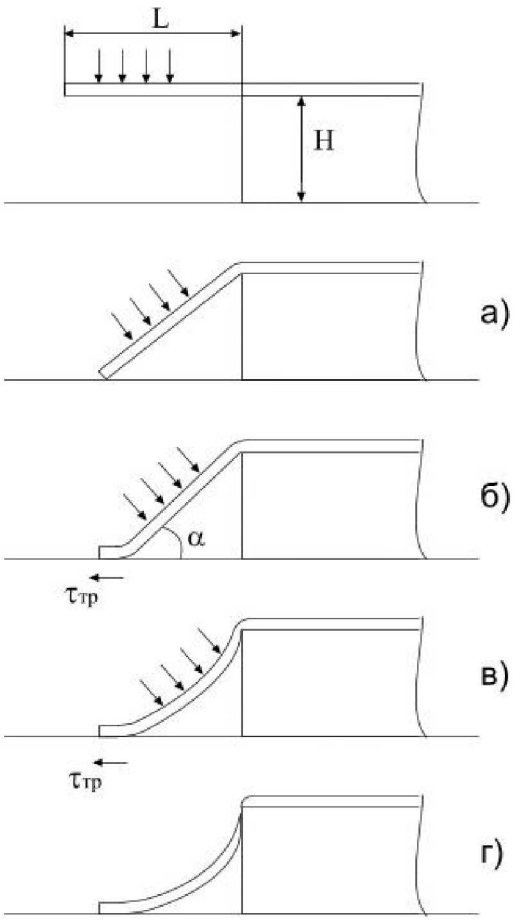


Рис. 26. Стадии процесса разделения металла при L > H

Таким образом, для осуществления разделительной операции с помощью эластичных сред необходимо выполнение условия: величина припуска должна быть больше высоты вырезного шаблона, но при этом надо помнить, чем больше высота вырезного шаблона, тем больше величина припуска. Большая длина свободного участка обеспечивает большие растягивающие напряжения и меньшее потребное давление для отделения отхода (резки).

И наоборот, чем меньше высота вырезного шаблона, тем меньше растягивающие напряжения и больше потребное для резки давление. Таким образом, с одной стороны, мы стремимся к уменьшению потребного давления

резки, расширению технологической возможности процесса и таким образом должны увеличивать высоту вырезного шаблона, а с другой стороны, экономические требования (расход металла на припуск) диктуют необходимость уменьшения припуска, что достигается уменьшением высоты вырезного шаблона.

Величина растягивающих напряжений (см. рис. 26) определяется величиной угла α – угла наклона припуска (отхода) к плоскости подштамповой плиты. Опыт показывает, что отделение (резка) пластичных металлов происходит, как правило, при углах α, близких к 45^0, а малопластичных – при 20^0.

Желание жесткого защемления отхода между заготовкой и подштамповой плитой требует как можно большего значения коэффициента трения металла заготовки о подштамповую плиту. Чем больше силы трения металла отхода о подштамповую плиту, тем более прочно защемляется отход (нет возможности подтянуться металлу заготовки к вырезному шаблону), возрастают растягивающие напряжения, снижается потребное давление резки.

Для увеличения коэффициента трения на подштамповой плите наносят насечки, что обеспечивает его значение, близкое к 0,5.

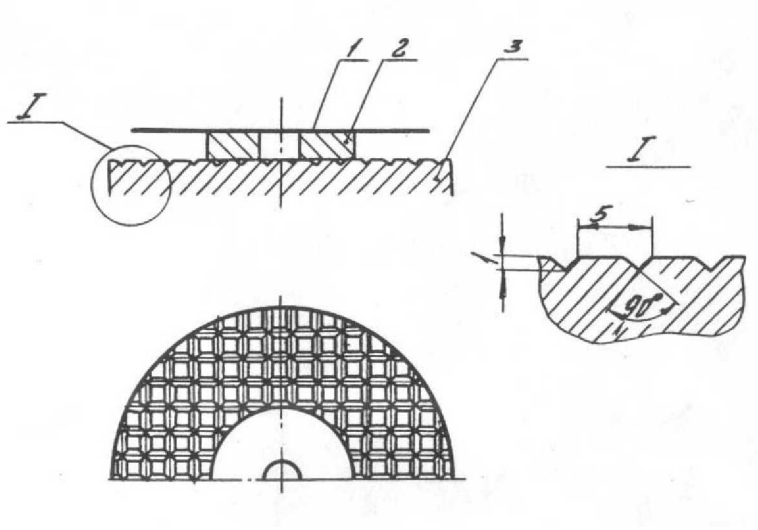


Рис. 27. Подштамповая плита с нанесенными рельефом – насечками:
1 – заготовка; 2 – вырезной шаблон; 3 – подштамповая плита

Таким образом, процесс резки эластичной среды определяется следующими параметрами: H, L, f, α, ρ – и, конечно, механическими свойствами материала заготовки ($\sigma_в$,δ).

2.3.1. Основы проектирования технологического процесса резки с использованием эластичной среды

Высота вырезного шаблона определяет величину припуска и необходимое давление резки. Величина припуска находится в прямой зависимости от высоты вырезного шаблона (чем больше высота вырезного шаблона, тем больше припуск), а потребное давление – в обратной (чем больше высота вырезного шаблона, тем меньше потребное давление).

Вот почему при проектировании технологического процесса резки выбирают оптимальное значение высоты вырезного шаблона, которое определяется по следующей формуле:

$$H = 3\,(1 + \delta\sqrt{S}), \qquad (1)$$

где δ – относительное удлинение материала заготовки;

S – толщина заготовки.

Полученное значение H в мм округляется в большую сторону до значения, кратного 0,5 мм. Некоторое увеличение толщины вырезного шаблона дает возможность в процессе эксплуатации осуществлять его перешлифовку, оставаясь в области значений, близких к оптимальным.

Размер припуска на обрезку зависит в основном от высоты вырезного шаблона и коэффициента трения между заготовкой и подштамповой плитой (f). Так, для резки заготовки на прямолинейном участке величина припуска составляет

$$L = \frac{H}{\sin\alpha} + \frac{1}{f}(H + S), \qquad (2)$$

α – угол между припуском и подштамповой плитой.

Для большинства пластичных материалов разделение происходит при $\alpha \approx 45^0$, и принимая, что H>>S, формулу (2) можно упростить:

$$L = (1{,}4 + \frac{1}{f})H. \qquad (3)$$

Если подштамповая плита гладкая, подвергнутая пескоструйной обработке, то коэффициент трения принимается равным f = 0,2, а при специальном рифлении – 0,5. Величина припуска в зависимости от значений f в этом случае будет в пределах L =(6,4 ÷ 3,4)H.

С экономической точки зрения для уменьшения величины припуска нужно использовать подштамповые плиты, обеспечивающие максимальный коэффициент трения.

Из сопоставления усилий, действующих на наклонную площадку припуска, и напряжений в очаге деформаций определяется потребное для разделения металла давление. На прямолинейном участке резки в конечном счете величина этого давления сводится к значению $p = \frac{\sigma_в \cdot S}{H}$.

Геометрическая форма детали (выпуклая, вогнутая) вносит коррективы в приведенную формулу, так как изменяется схема напряженного состояния в очаге деформаций.

Таким образом, проектирование технологического процесса вырубки-пробивки эластичными средами сводится к определению трех технологических параметров: высоты вырезного шаблона, величины припуска и потребного давления.

Более подробно вопросы проектирования технологического процесса и расчета исполнительных размеров контейнера приводятся на практическом занятии.

2.3.2. Детали, полученные резкой эластичными средами. Технологические возможности

При использовании операций резки эластичными средами получают детали практически любой сложной конфигурации, размером от нескольких мм до метра. Одновременно с вырезкой по контуру за один ход пресса производится пробивка отверстий и пазов различной формы. Материал вырезаемых деталей - алюминиевые и медные сплавы, обычно толщиной от 0,05 до 2 мм, сталь (углеродистая, легированная, нержавеющая), титановые сплавы, толщиной до 1,0 мм (рис. 28).

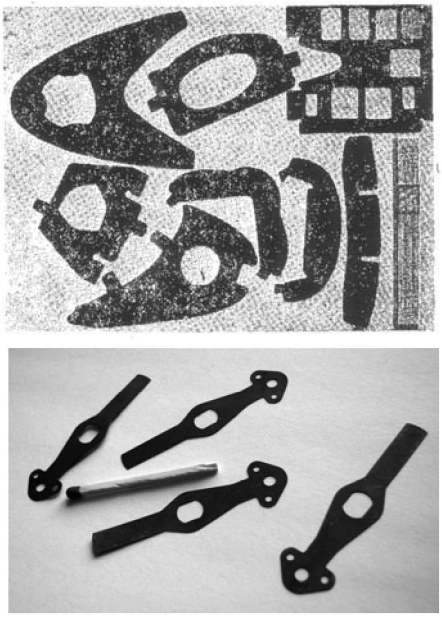


Рис. 28. Примеры деталей, полученных вырезкой эластичной средой

Наименьшая толщина вырезаемых деталей практически неограничена. Именно для сверхтонких материалов (0,02-0,05 мм) инструментальные штампы особенно сложны и дороги в производстве из-за необходимости обеспечения беззазорной подгонки матрицы с пуансоном. Минимальные диаметры пробиваемых отверстий (3-5) S.

Поверхность среза (рис.29) после вырубки-пробивки эластичной средой будет неровной: имеет утяжины и скол и характеризуется следующими показателями:

для пластичных металлов α =(0,5-0,7)S, в =(0,75÷1,15)S, r ≈ S, Δ =(0,07...0,12)S;

для малопластичных α = (0,25-0,45)S; в = (0,35 ÷ 0,65)S, r = 0,5S Δ = (0,05-0,1)S.

Точность размеров деталей, вырезанных эластичной средой, выше, чем у деталей, полученных в штампах при толщине заготовки до 0,2 мм. С увеличением толщины материала точность деталей, вырезаемых эластичной средой, снижается, и при толщине близкой к 1 мм, и габаритных размерах деталей более 50 мм, оба способа дают фактически одинаковую точность.

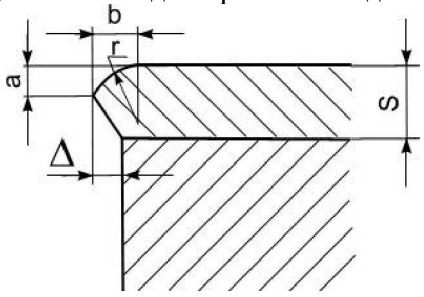


Рис. 29. Геометрия поверхности разделения
при резке эластичными средами

Шероховатость поверхности среза на деталях толщиной до 1,5 мм, вырезаемых из пластичных материалов, $R_z40 \div R_z20$.

2.3.3. Эффективность процессов резки эластичными средами. Область рационального применения технологии

Экономическая эффективность внедрения в производство процессов резки эластичными средами по сравнению с инструментальными штампами достигается в первую очередь за счет значительного удешевления оснастки и снижения:

- затрат на проектирование вырезного шаблона в 10-20 раз;
- его металлоемкости в сотни раз (вес инструментального штампа килограммы, вырубного шаблона – граммы),
- трудоемкости изготовления в 20-30 раз.

Все это обеспечивает значительное сокращение сроков подготовки производства. Если на проектирование и изготовление штампа требуется несколько недель, а то и месяцев, то вырезной шаблон рассчитывается и изготавливается за несколько часов.

Кроме того, значительно сокращаются расходы на складирование и хранение оснастки, потребность в площадях для хранения оснастки уменьшается в 30-50 раз.

С другой стороны, использование технологии резки эластичными средами сопровождается повышенным расходом металла. Так, если при резке в инструментальном штампе припуск для обрезки составляет (2÷3)S, то при резке эластичными средами может достигать (9-18)S. Увеличиваются время изготовления деталей (трудоемкость), в т.ч. как следствие применения более тихоходных гидравлических прессов; необходимое усилие пресса (большая часть усилия расходуется на сжатие самой эластичной среды).

Таким образом, технологический процесс вырубки-пробивки эластичными средами имеет как преимущества, так и недостатки. Выбор технологии определяется программой выпуска деталей N, их конечной технологической себестоимостью С (рис.30).

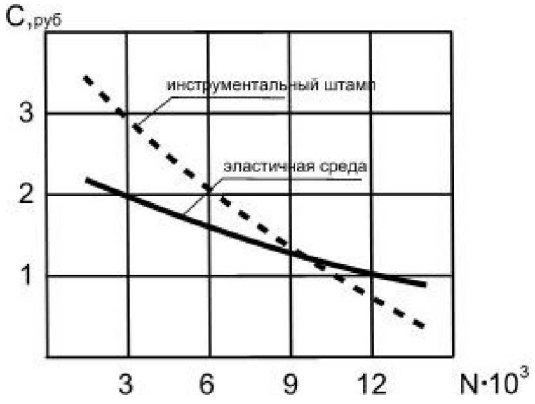


Рис. 30. Зависимость себестоимости детали от программы выпуска

Из приведенных графиков изменения себестоимости конкретной детали в зависимости от программы выпуска для двух вариантов технологий – с использованием инструментального штампа и эластичной среды – следует, что вырубка-пробивка эластичной средой экономически обоснована при программе выпуска до 9500 штук в год.

Технологическая себестоимость включает все составляющие затрат: расходы, связанные с приобретением или содержанием оборудованием, изготовлением оснастки, расходом металла, трудоемкостью изготовления, содержанием площадей зданий и другими.

Экономический анализ, проведенный рядом авторов для различных деталей, показал, что процесс вырезки деталей эластичными средами и полиуретаном в частности, целесообразно применять при годовой программе выпуска 5000-25000 штук, то есть в основном при мелкосерийном производстве.

2.3.4. Проектирование процесса вырубки-пробивки эластичной средой при изготовлении конкретной типовой детали

Последовательность проектирования:

1. Выбор технологической схемы

Наибольшее усилие развивается при выборе закрытой схемы штамповки. Удобство эксплуатации обеспечивает верхнее расположение контейнера.

Выбранная схема приведена на рис. 31.

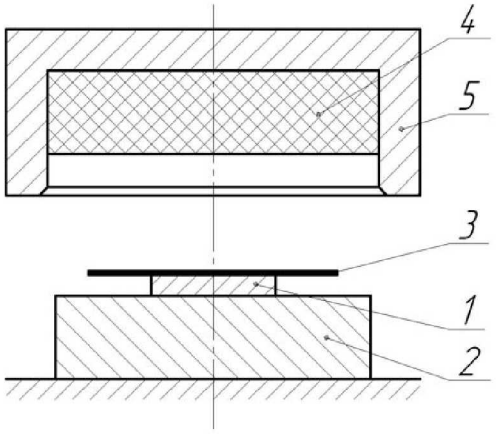


Рис. 31. Технологическая схема резки эластичной средой
в закрытом объеме с верхним расположением контейнера:
1 – вырезной шаблон; 2 – подштамповая плита; 3 – заготовка;
4 – полиуретан; 5 – контейнер

2. Определение высоты вырезного шаблона

Усилие, необходимое для вырубки-пробивки с использованием эластичной среды, зависит от высоты вырезного шаблона. С увеличением высоты потребное усилие падает, но, как было рассмотрено ранее, растет величина припуска.

Оптимальная высота вырезного шаблона определяется по формуле

$$H = 3(1+\delta)\sqrt{S},$$

где S – толщина материала заготовки;

δ – относительное удлинение (в относительных величинах) материала.

Полученное значение H следует округлить в большую сторону до величины, кратной 0,5 мм.

3. Расчет припуска на обрезку. Определение размеров исходной заготовки

Размер припуска на обрезку зависит от высоты вырезного шаблона, конфигурации детали и коэффициента трения между заготовкой и подштамповой плитой. Все перечисленные факторы определяют напряженно-деформированное состояние материала в очаге деформации резки: высота шаблона и коэффициент трения определяют уровень растяжения материала в одной плоскости детали, конфигурация – напряжения растяжения или сжатия в другой.

Размер припуска для обрезки следует определять по таблице 2.

Таблица 2. Определение размера припуска

Определяемая величина	Расчетная формула	Примечание
Размер припуска заготовки на прямолинейном участке детали или криволинейном при R≥5H	$L = 1{,}4H + \frac{1}{f}(H+S)$	
	L = 6,4H + 5S	При f ≈ 0,2
	L = 3,4H + 2S	При f ≈ 0,5
Размер припуска заготовки на криволинейном выпуклом участке детали радиусом R	$L_{вып} = 1{,}4H + \frac{(H+S)(2R+H)}{2f(R+H)}$	При R ≤ 5H
Размер припуска заготовки на криволинейном вогнутом участке детали	$L_{вогн} = 1{,}4H + \frac{(H+S)(2R-H)}{2f(R-H)}$	При 2H≤R≤5H

Коэффициент трения проектант выбирает самостоятельно исходя из вида обработки, подштамповой плиты. С экономической точки зрения целесообразно обеспечить f=0,5, но для этого необходимо будет на подштамповой плите нанести (выполнить) неглубокие (до 0,5мм) насечки.

Полученные значения припуска L на разных участках детали откладываются по ее периметру (рис. 32), что определяет размер исходной прямоугольной карточки-заготовки A x B, из которой будет получена деталь.

Прямоугольная форма исходной карточки определяется предполагаемой технологией ее получения на гильотинных ножницах.

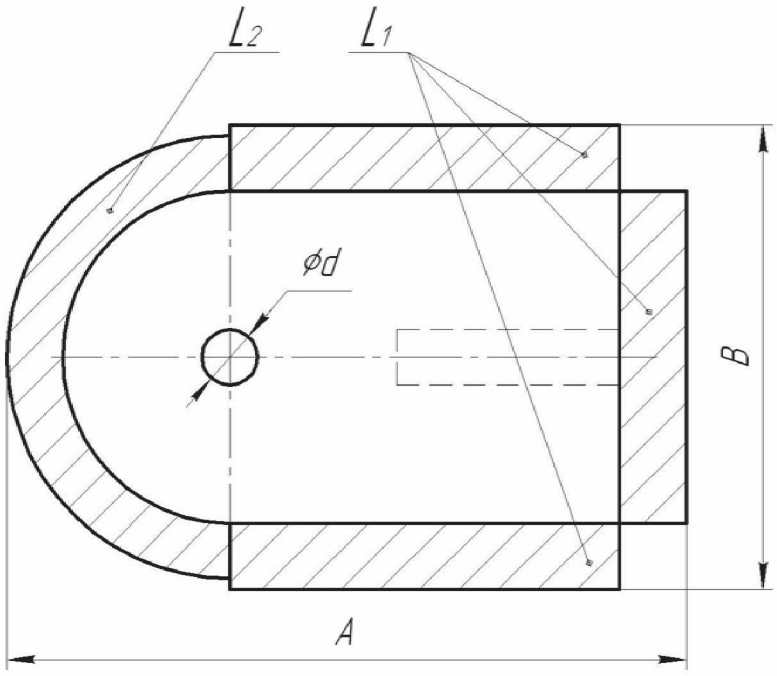


Рис. 32. Размеры исходной заготовки

4. Определение давления, необходимого для выполнения операции вырубки-пробивки

Давление, необходимое для вырезки-пробивки зависит от механических свойств материала заготовки, ее толщины, высоты вырезного шаблона и конфигурации детали (напряженно-деформированное состояние при разделении) и может быть определено по таблице 3.

Деталь разбивается на характерные внешние участки: прямолинейные, криволинейные (выпуклые, вогнутые) и соответствующие по конфигурации отверстия и пазы. Для каждого участка, для каждого отверстия или паза определяется потребное давление.

Таблица 3. Определение давления вырезки-пробивки

Определяемая величина	Расчетная формула	Примечание
Давление, необходимое для вырезки прямолинейного участка контура детали или криволинейного при R>5H	$p=\frac{\sigma_b S}{H}$	
Давление, необходимое для вырезки выпуклого участка контура детали	$p=\frac{0{,}8S\sigma_b}{H}$	При $R<2H$
	$p=\frac{2RS\sigma_b}{H(2R+H)}$	При R=(2-5)H
Давление, необходимое для вырезки вогнутого участка контура детали	$p=\frac{1{,}5S\sigma_b}{R}$	При $R<2H$
	$p=\frac{2RS\sigma_b}{H(2R-H)}$	При R = (2-5)H
Давление, необходимое для пробивки отверстий	$p=\frac{3S\sigma_b}{d}$	При $d\leq 12S$
	$p=\frac{2RS\sigma_b}{H(2R-H)}$	При $d>12S$
Давление, необходимое для пробивки прямоугольного отверстия или паза	$p=\frac{2S(a+b)\sigma_b}{a\cdot b}$	При $a\leq 15S$
	$p=\frac{S\sigma_b}{H}$	При $a>15S$
Давление, необходимое для пробивки отверстий треугольной формы	$p=\frac{6S\sigma_b}{c}$	

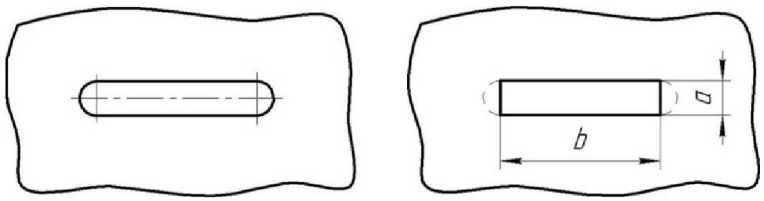
Здесь:

d – диаметр пробиваемого отверстия в мм;

a и b – размеры пробиваемого паза, причем a – минимальный размер;

c – минимальный размер пробиваемого треугольного паза.

Если конфигурация паза имеет более сложную форму, то ее следует аппроксимировать – привести к более простому виду (рис. 33).



а) б)

Рис. 33. Пример аппроксимации элементов детали:
а) реальная конфигурация паза; б) расчетная конфигурация паза

Полученные значений давлений $p_{прям}$, $p_{вып}$, $p_{отв}$, $p_{паза}$ сравниваются между собой и, естественно, далее в расчеты берется то p_{max}, которое требуется создать в контейнере для полного разделения металла при вырубке и пробивке.

5. Расчет усилия пресса

Усилие пресса, необходимое для вырубки-пробивки определяется по формуле

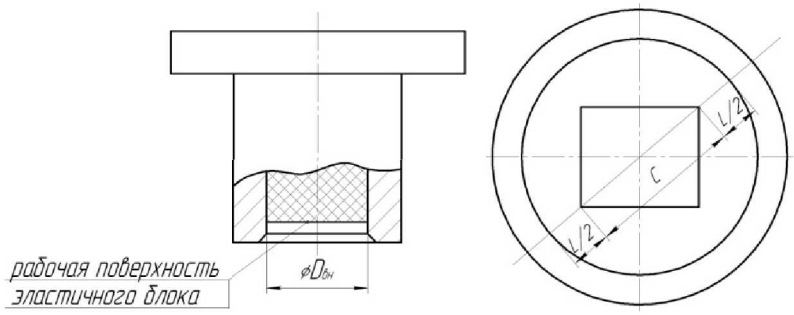
$$P = Kp_{max} F,$$

где К – коэффициент запаса, принимаемый равным 1,3;

p_{max} – максимальное давление, которое необходимо развить в эластичной среде и прикладываемое ко всей рабочей поверхности эластичного блока;

F – площадь рабочей поверхности эластичного блока.

Контейнеры для штамповки эластичной средой имеют, как правило, цилиндрическую конструкцию как более прочную (рис.34).



А Вид А

Рис. 34. Типовой контейнер для штамповки эластичной средой

Диаметр эластичного блока – внутренний диаметр контейнера определяется из условия свободного размещения заготовки (исходной карточки размерами А×Б.

Для свободного размещения заготовки расстояние между внутренней стенкой контейнера и заготовкой принимается равным половине определенного ранее максимального припуска на обрезку $L_{max.}$.

Предполагается, что заготовка располагается по центру контейнера. Из рис. 34 видно, что внутренний диаметр контейнера будет равен $D_{вн} = C + L$, где С – диагональ исходной прямоугольной карточки $C = \sqrt{A^2 + B^2}$.

Рабочая площадь эластичного блока F будет равна $F = \frac{\pi D_{вн}^2}{4}$.

6. Расчет исполнительных размеров контейнеров

При проектировании контейнера необходимо определить:

а) толщину эластичной подушки h = (4 ÷ 5)H.

Из условий эксплуатации минимальная толщина эластичной подушки должна быть 25 мм. Поэтому если расчетное значение $h_п$ будет меньше 25 мм, конструктор должен заложить в чертеж ее значение, равное 25 мм.

б) глубину заходной части контейнера $C_к$ (рис.35), то есть ту глубину, на которую в начальный момент штамповки должна войти в контейнер подштамповая плита с расположенным на ней вырезным шаблоном и заготовкой до соприкосновения с эластичным блоком, то есть образовать в дальнейшем при рабочем ходе для эластичной среды замкнутый объем.

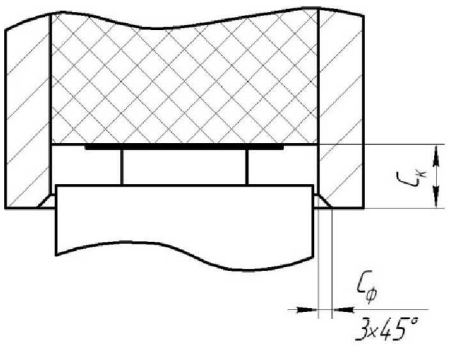


Рис. 35. Определение заходной части контейнера

$C_к = H + S + C_ф$

$C_ф$ – размер заходной фаски.

в) глубину внутренней полости контейнера h_k (рис.36):

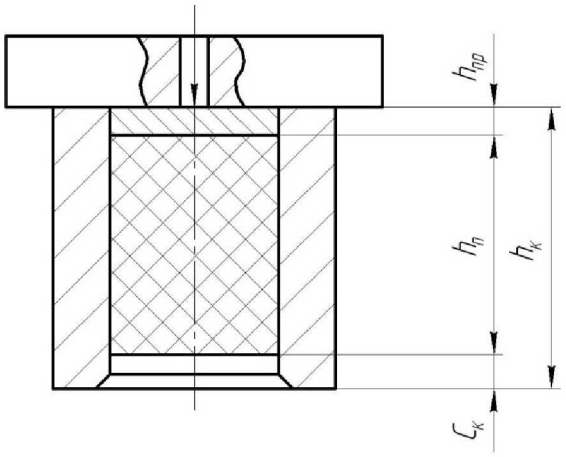


Рис. 36. Определение глубины контейнера

$$h_к = h_п + C_к + h_{пр},$$

где $h_{пр}$ – толщина прокладки, расположенной в донной части контейнера и служащей для выпрессовки изношенной эластичной среды из контейнера.

Величина $h_{пр}$ назначается из конструктивных соображений и обычно принимается равной 10 мм.

г) толщину стенки контейнера t (рис. 37):

Свободную часть цилиндрического контейнера как наиболее слабую можно представить как толстостенную трубу под внутренним давлением p_{max}.

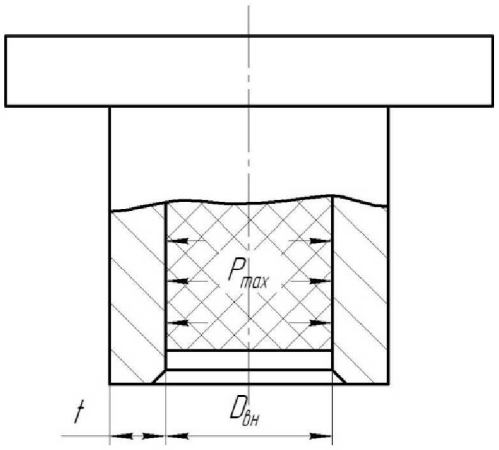


Рис. 37. Определение толщины стенки контейнера

Толщину стенки такой трубы можно определить по формуле Ляме из условия ее прочности при переходе в пластичное состояние

$$p = \frac{2t\sigma_{0,2}}{D_{вн}},$$

$$t = \frac{p_{\max} \cdot D_{вн}}{2\sigma_{0,2}} \cdot n,$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала контейнера;

n – коэффициент запаса прочности 3 ÷ 4.

По результатам расчета делается сводный чертеж контейнера, с проставлением расчетных размеров.

На практике (в заводских условиях) конечно на каждую деталь не изготавливают контейнер. Имеется набор (3-5) стандартных контейнеров диаметром от 150 до 500 и более мм.

А выполненные выше расчеты в таком случае носят проверочный (оценочный) характер.

2.3.5. Пример расчета

Требуется рассчитать параметры технологического процесса вырубки-пробивки эластичной средой детали, показанной на рис.38.

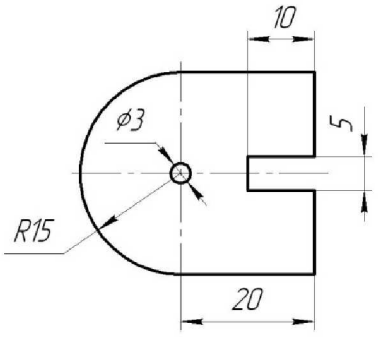


Рис. 38. Деталь для расчета

Толщина материала заготовки S = 0,5мм.

Механические свойства материала заготовки: σ_b=10 кг/мм^2; δ = 0,15.

1. Определяем высоту вырезного шаблона:

$$H = 3 \cdot (1 + \delta) \cdot \sqrt{S} = 3 \cdot (1 + 0{,}15) \cdot \sqrt{0{,}5} = 2{,}44 \approx 2{,}5 мм \,.$$

Принимая f = 0,5, рассчитываем величину припуска на прямолинейном участке и криволинейном (R>5H):

$$L = 3{,}4 \cdot H + 2 \cdot S = 3{,}4 \cdot 2{,}5 + 2 \cdot 0{,}5 = 9{,}5 мм.$$

Тогда размер заготовки равен:

$$A \times B = \left[15 + 20 + 9{,}5 \cdot 2\right] \times \left[30 + 9{,}5 \cdot 2\right] = 54 \times 49 мм^2.$$

2. Определяем давления вырезки детали по наружному контуру и пробивки отверстия и паза.

Вырезка наружного контура детали:
прямолинейного участка и криволинейного участка при (R>5H)

$$p_1 = p_2 = \frac{\sigma_b \cdot S}{H} = \frac{10 \cdot 0{,}5}{2{,}5} = 2 кг / мм^2.$$

пробивка отверстия:

$$P_3 = \frac{3 \cdot S \cdot \sigma_b}{d} = \frac{3 \cdot 0{,}5 \cdot 10}{3} = 5 кг / мм^2.$$

пробивка паза:

$$P_4 = \frac{2 \cdot S \cdot (a+b) \cdot \sigma_b}{a \cdot b} = \frac{2 \cdot 0{,}5 \cdot (5+10) \cdot 10}{5 \cdot 10} = 3 кг / мм^2 .$$

Для получения данной детали в контейнере нужно создать максимальное рассчитанное давление 5 кг/мм^2.

3. Определяем усилие пресса по формуле

$$P = K_{пр} \cdot p \cdot F,$$

где F – площадь рабочей поверхности эластичной среды.

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{54^2 + 49^2} = 72{,}9 \approx 73 мм,$$

$$D_{вн} = C + L = 73 + 9.5 = 82{,}5 мм,$$

$$P = 1{,}3 \cdot 5 \cdot \frac{\pi \cdot 82{,}5^2}{4} \approx 35000 кг.$$

4. Найдем основные размеры контейнера:

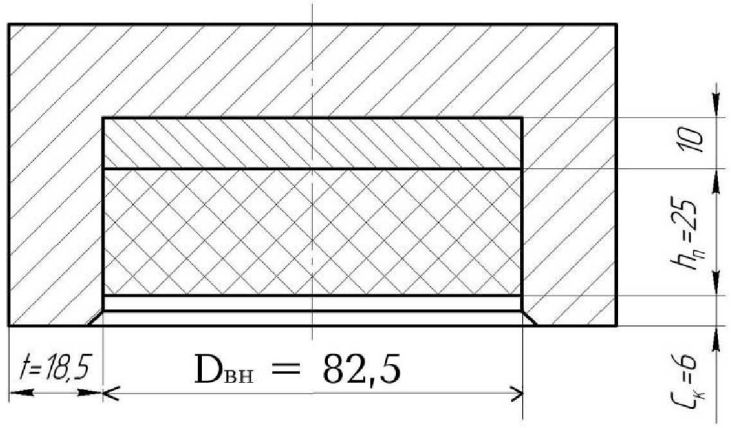
$$C_к = H + S + C_ф = 2{,}5 + 0{,}5 + 3 = 6 мм,$$

$$h_п = (4 \div 5) H = 25 мм,$$

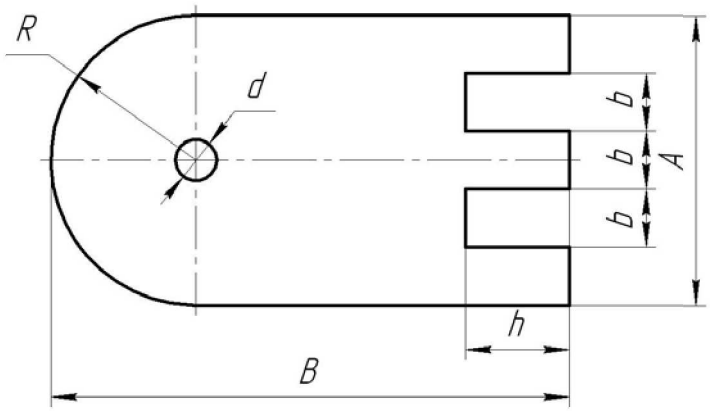
$$t = \frac{p \cdot D_{вн}}{2 \cdot \sigma_{0.2}} \cdot n = \frac{5 \cdot 82{,}5}{2 \cdot 45} \cdot 4 = 18{,}33 мм.$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала контейнера.

6. Чертеж контейнера

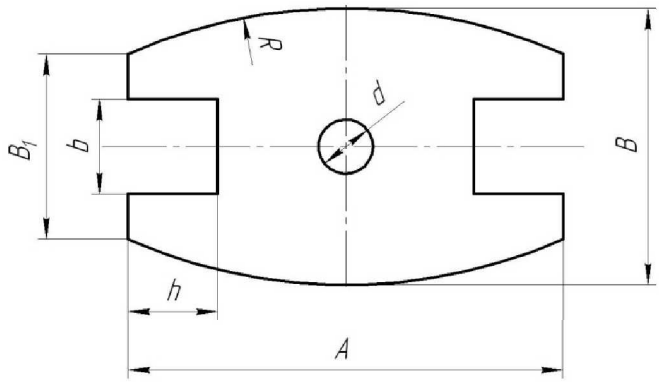


2.3.6. Задания для контрольной работы



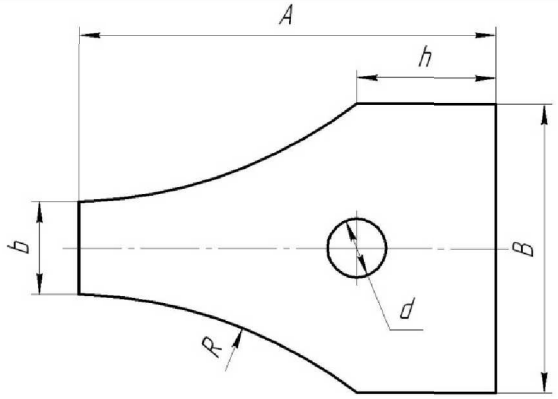
1

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм					
		d	A	B	R	h	b
δ=0,5; σ_b=30	0,5	5	30	40	15	8	4
δ=0,15; σ_b=30	0,8	5	30	50	15	8	4
δ=0,1; σ_b=10	1,2	5	30	60	15	8	5



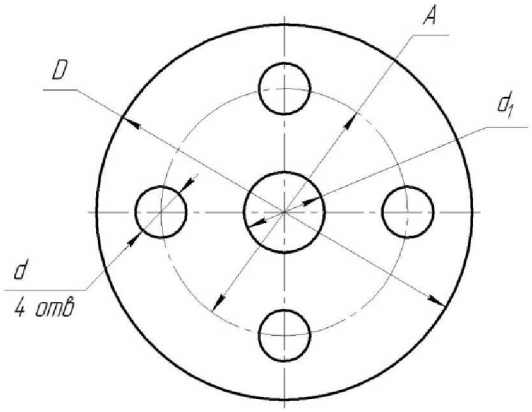
2

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм						
		d	R	A	B	b	B_1	h
δ=0,1; σ_b=40	0,2	4	80	40	25	2	15	6
δ=0,2; σ_b=30	0,3	5	80	40	25	4	15	6
δ=0,1; σ_b=10	0,5	4	80	40	25	4	15	6



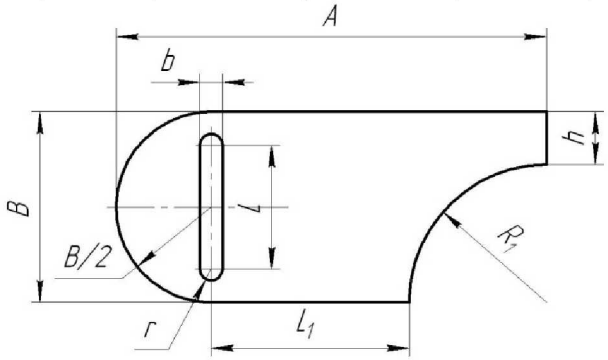
3

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм					
		d	A	B	b	R	h
δ=0,1 σ_b=30	0,1	2	50	30	10	40	10
δ=0,2 σ_b=20	0,5	4	50	40	10	40	10
δ=0,3σ_b=10	0,75	5	50	50	10	40	10



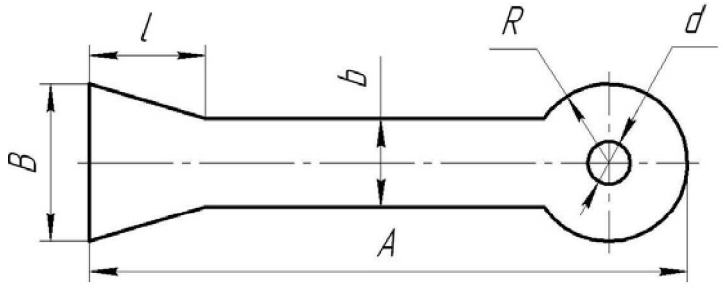
4

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм			
		A	D	d	d_1
δ=0,15; σ_b=45	0,5	30	40	5	10
δ=0,2; σ_b=40	0,75	40	50	5	10
δ=0,3; σ_b=50	1,0	50	60	5	10



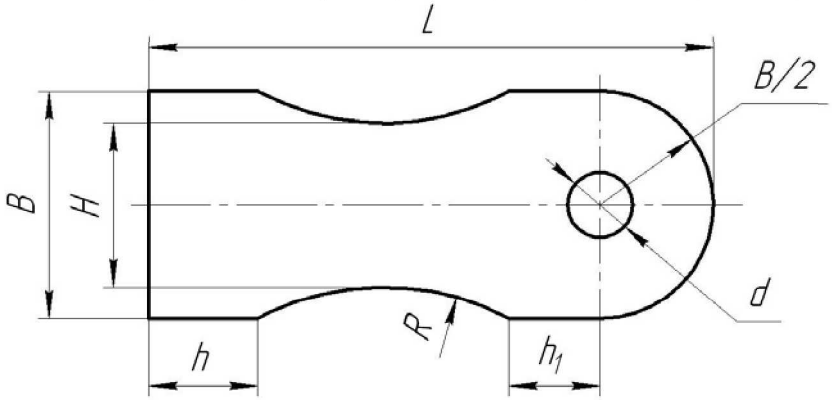
5

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм							
		r	L	R_1	b	A	B	L_1	h
δ=0,2; σ_b=30	0,5	1,5	10/2	10	3	50	15	30	5
δ=0,3; σ_b=20	1,0	2,0	10/2	10	4	50	15	30	5
δ=0,4; σ_b=10	1,2	3,0	10/2	10	6	50	15	30	5



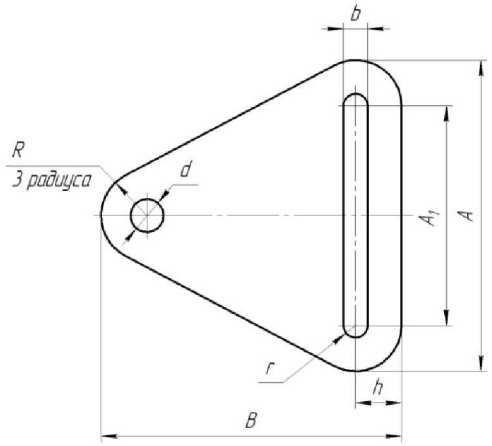
6

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм						
		d	A	D	R	B	b	l
δ=0,6; σ_b=20	0,1	3	60	20	10	20	10	20
δ=0,3; σ_b=30	0,3	3	60	20	10	20	10	20
δ=0,15; σ_b=10	0,9	3	60	20	10	20	10	20



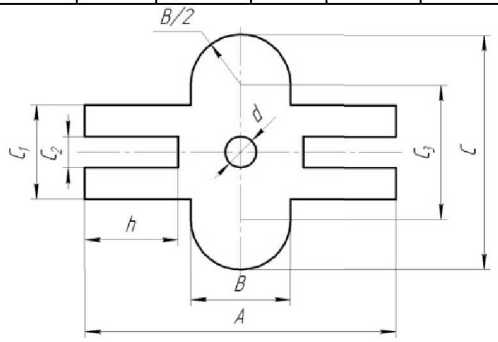
7

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм						
		d	B	R	L	H	h	h_1
δ=0,1; σ_b=40	0,5	5	15	50	40	10	10	10
δ=0,2; σ_b=20	0,6	5	15	50	50	10	10	10
δ=0,6; σ_b=45	0,7	5	15	50	30	10	10	10



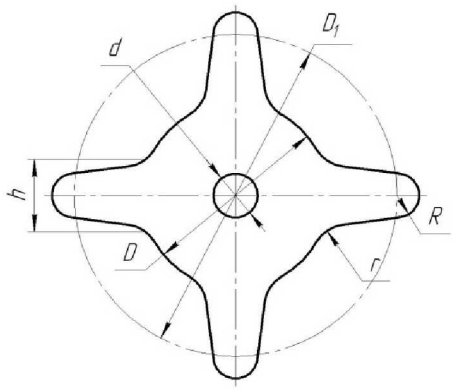
8

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм						
		d	A	A_1	B	R	b	r
δ=0,35; σ_b=10	0,5	4	40	30	40	10	4	2
δ=0,1; σ_b=50	1,0	5	40	30	40	10	6	3
δ=0,2; σ_b=40	0,5	10	50	40	50	15	10	5



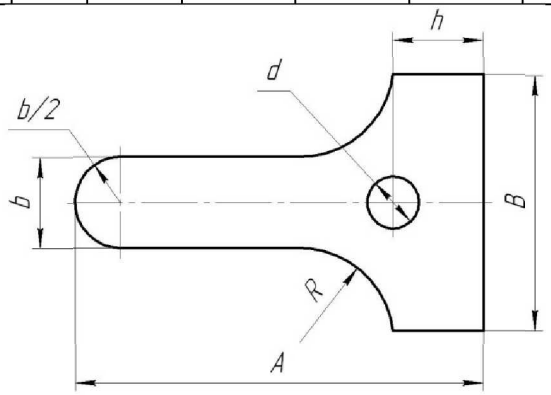
9

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм							
		d	B	A	h	C	C_1	C_2	C_3
δ=0,1; σ_b=20	0,1	5	20	60	10	40	15	5	20
δ=0,2; σ_b=30	0,2	5	30	60	10	40	15	5	20
δ=0,3; σ_b=40	0,3	5	40	60	10	40	15	5	20



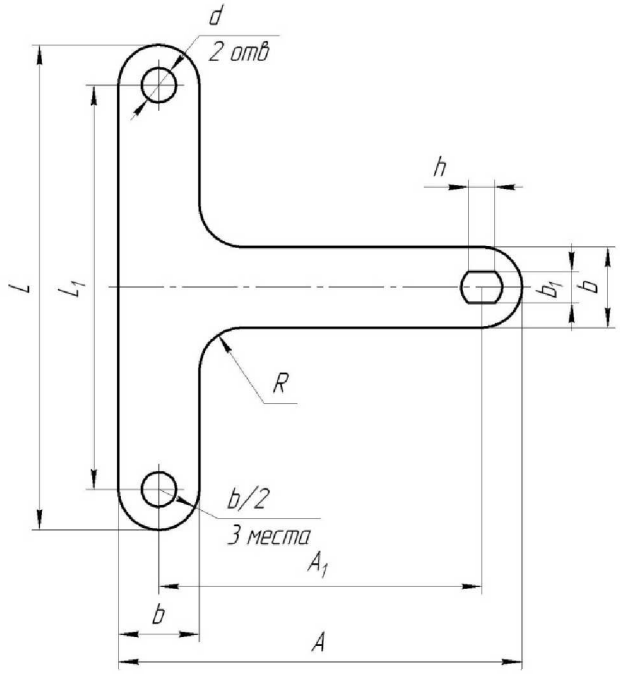
10

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм					
		d	D	D_1	R	r	h
δ=0,15; σ_b=10	0,8	5	40	60	3	1.5	5
δ=0,25; σ_b=15	0,9	5	40	60	3	2.0	5
δ=0,35; σ_b=20	1,2	5	40	60	3	3.0	5



11

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм					
		d	A	B	b	R	h
δ=0,1; σ_b=15	0,5	5	30	30	10	10	10
δ=0,3; σ_b=20	0,35	5	35	35	10	10	10
δ=0,6; σ_b=40	0,25	5	40	40	10	10	10



12

Марка материала	S	Геометрические параметры, мм								
		d	A	A_1	L	L_1	b	b_1	R	h
δ=0,25; σ_b=10	0,1	3	40	30	30	20	10	3	5	2
δ=0,3; σ_b=10	0,5	5	40	30	30	20	10	5	5	2
δ=0,3; σ_b=40	1,0	5	40	30	30	20	10	5	5	2

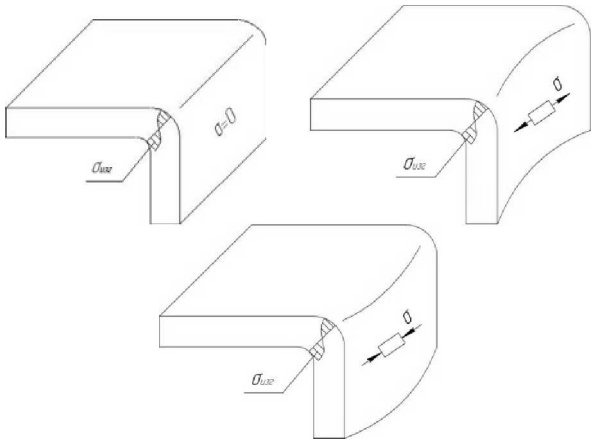
2.4. Формообразующие операции, осуществляемые эластичными средами

К формообразующим операциям, осуществляемым с использованием эластичных сред, относятся операции гибки, гибки-формовки, рельефной формовки, вытяжки, формовки полых заготовок, прессование профилей и др.

2.4.1. Гибка, гибка-формовка

Наибольшее распространение из перечисленных операций получили операции гибки и гибки-формовки. Операция гибки листовой заготовки

применяется для образования боковой стенки детали. Если отгибаемый незамкнутый борт имеет прямолинейную форму, то при гибке по радиусу гиба возникают изгибные напряжения, а стенка борта остается ненапряженной. Такая операция называется «гибка» (рис.39).



а) б) в)

Рис. 39. Операции гибки: а) гибка; б) гибка-формовка;
в) отбортовка отверстия и наружного контура

Если отгибаемый борт имеет кривизну (вогнутую или выпуклую), то при гибке по радиусу гиба также возникают изгибные напряжения, но, кроме того, напряжения (растяжения или сжатия) возникают и в стенке отгибаемого борта. Такая операция носит название «гибки-формовки». В частном случае операции гибки-формовки, когда криволинейный борт является замкнутым, операция гибки-формовки носит название отбортовки отверстия или наружного замкнутого контура.

Для реализации процессов гибки и гибки-формовки могут быть использованы открытая, полуоткрытая или контейнерная закрытая схемы штамповки.

На рис. 40 даны примеры осуществления процессов гибки при использовании открытой и полуоткрытой технологических схем. При этом даны примеры использования некоторых технологических приемов: гибка в один или несколько переходов без и с переворотом заготовки, с использованием одного или нескольких пуансонов или сменных эластичных блоков. Реализация этих схем возможна лишь в тех случаях, когда для их осуществления необходимы небольшие давления.

Особенностью гибки эластичной средой является плавность, последовательность передачи заготовке давления по все увеличивающейся

деформируемой площади заготовки. Деформация развивается равномерно от вершины к периферии. В инструментальных методах гибки давления на заготовку передаются через локальные участки (точки контакта). Поэтому уровень остаточных напряжений в готовой детали, полученной эластичной средой, ниже, чем у полученной в инструментальном штампе.

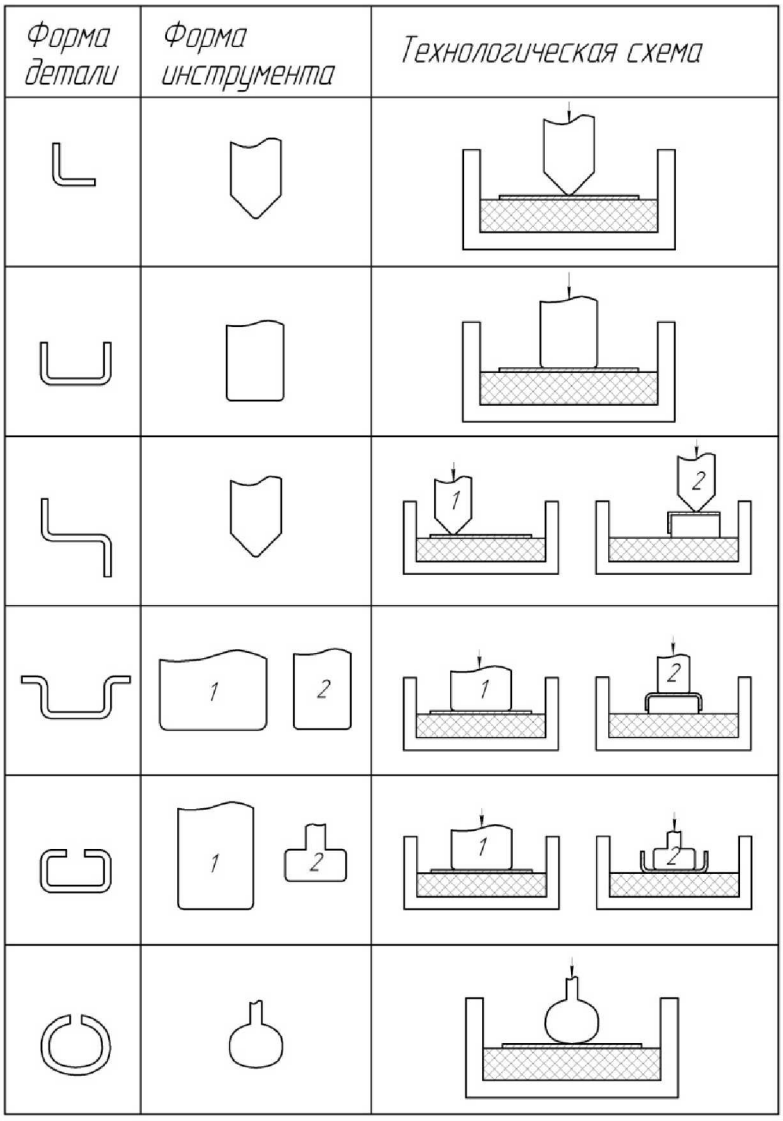


Рис. 40. Гибка при открытой и полуоткрытой схемах

Наибольшие давления, а следовательно, и более широкие технологические возможности реализуются при использовании закрытой контейнерной схемы.

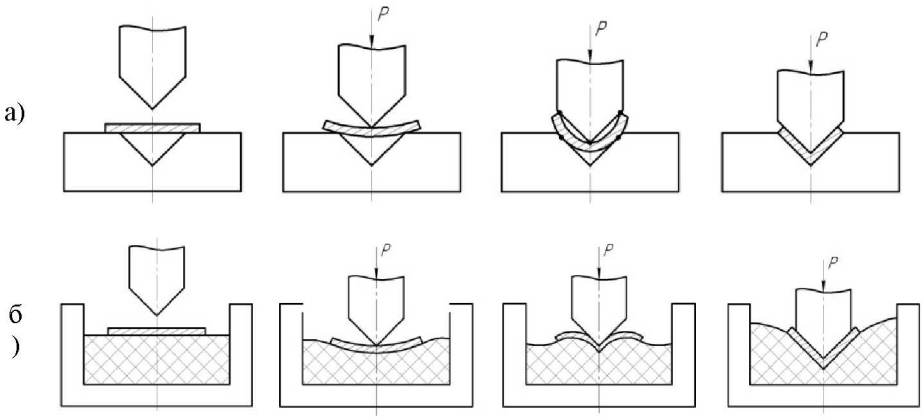


Рис. 41. Последовательность гибки в инструментальном штампе (а) и эластичной средой (б)

При этой схеме штамповки необходимо учитывать особенность гибки коротких жестких бортов. С уменьшением длины отгибаемого участка возрастает его жесткость, то есть сопротивление изгибу. При условии, когда сопротивление изгибу борта становится больше сопротивления течению эластичной среды, в зазор между заготовкой и внутренней стенкой контейнера эластичная среда может затекать под изгибаемый борт и препятствовать его дальнейшей гибке. (см. рис. 21).

Вот почему при оценке технологичности детали, то есть возможности ее изготовления эластичной средой, прежде всего оценивается минимально возможная высота отгибаемого борта, например, при r = 3S и угле гиба $\alpha = 90^0$ она будет равна

$$h_{\min} = \sqrt{\frac{\sigma_в \cdot S^2}{2p}} + 4S \qquad (4)$$

При этом в расчет закладывается максимальное давление p = 10 кг/мм^2, которое выдерживает эластичная среда.

Если заданная по чертежу высота отгибаемого борта h меньше h_{min}, то следует признать, что деталь нетехнологична для ее изготовления эластичной средой.

Параметр оценки технологичности детали по h_{min} присущ только процессу гибки эластичной средой в закрытом объеме, учитывает особенность гибки эластичной средой коротких жестких бортов.

Процесс проектирования технологического процесса гибки эластичной средой сводится к определению двух деформационно-силовых параметров процесса: потребного давления и величины угла пружинения.

Потребное давление гибки p определяется из условия равенства моментов внутренних и внешних сил (рис. 42).

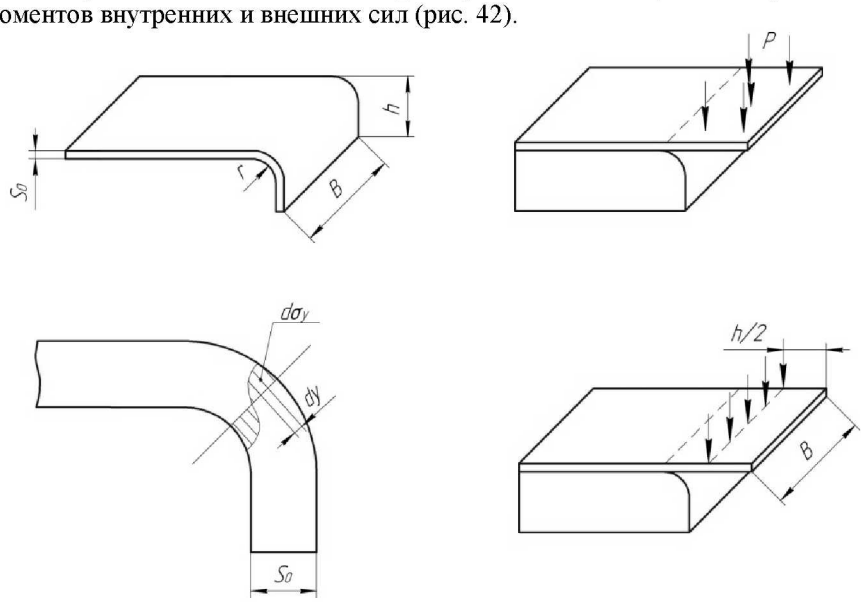


Рис. 42. Силовое воздействие эластичной среды
на отгибаемый борт. Распределение напряжений

Момент внутренних сил определяется по формуле

$$M_{вн} = 2\int_{o}^{\varepsilon} d\sigma(y)\cdot dy, \tag{5}$$

где ε – деформация, определяемая значением угла гиба.

Принимая, что равнодействующая сила от действия давления p приложена к середине отгибаемого борта, то есть, что плечо приложения силы равно h/2, получим момент внешних сил, равный

$$M_{вн} = \frac{ph^2}{2}B. \tag{6}$$

Из равенства моментов, принимая возникающие напряжения максимальными и равными пределу прочности материала заготовки для случая гибки на угол $\alpha=90^0$, после некоторых преобразований получим

$$p = \frac{\sigma_в \cdot S_0^2}{2(h-r-0{,}5S_0)^2}. \tag{7}$$

Рассчитанное давление обеспечивает полное прилегание борта к формблоку.

После снятия давления в результате упругой разгрузки (рис.43) борт займет положение, отличное от заданного формблока, и может выйти за пределы допуска, определяемого чертежом детали.

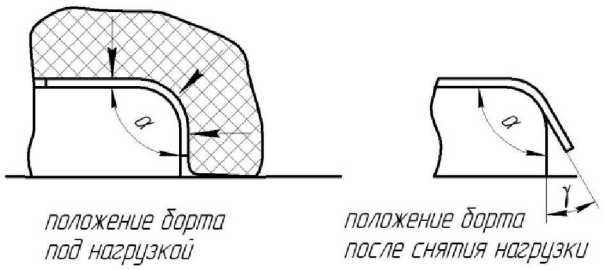


Рис. 43. Упругое пружинение при гибке эластичной средой

Для получения детали с заданной точностью необходимо угол гиба скорректировать на величину угла пружинения: $\alpha_{скор} = \alpha_{черт} + \gamma$. В этом случае борт гнется на больший угол ($\alpha + \gamma$), а после разгрузки займет положение, обеспечивающее заданный по чертежу угол гиба α (рис. 44).

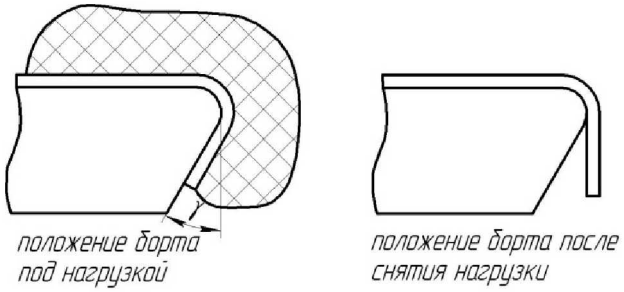


Рис. 44. Корректировка размера формблока
на величину угла пружинения

Структура формулы для определения упругой отдачи (пружинения) определяется из приведенного на рисунке 45 треугольника диаграммы σ-ε; упругая разгрузка (отрезок *ab*) = $\sigma_в/E$, а с учетом ее зависимости от геометрических размеров r/S,α формула примет вид:

$$\gamma = \frac{3\sigma_в}{E}(r/S + 0{,}5)\alpha. \qquad (8)$$

Изучению зависимости угла пружинения от радиуса (r) и угла гиба (α) посвящена одна из лабораторных работ курса.

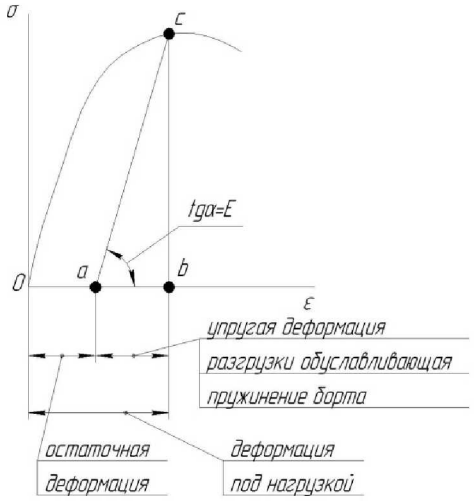


Рис. 45. Диаграмма «σ-ε»

На рис. 46 приведены фотографии деталей, полученных с помощью операций гибки, гибки-формовки эластичными средами. Материал деталей – алюминиевые, медные, титановые сплавы, стали. Габаритные размеры – до 1000 мм, толщины – до 3-4 мм.



Рис. 46. Примеры деталей, полученных гибкой, гибкой-формовкой эластичной средой

2.4.1.1. Проектирование процесса гибки эластичной средой при изготовлении типовой детали

Порядок проектирования технологического процесса:

1. Оценка технологичности детали, то есть возможности изготовления данной детали. Оценка технологичности ведется по двум параметрам – r_{min} и h_{min}.

Прежде всего надо выбрать технологическую схему. Выбираем ту, которая обеспечивает наибольшее давление, то есть закрытую контейнерную схему. Далее воспользуемся таблицей, с помощью которой можно определить r_{min}, который зависит от марки материала (то есть механических свойств), его термического состояния и направления линии гиба по отношению к направлению прокатки (деформационная анизотропия).

Таблица 4. Определение радиусов гиба

Материал	В отожженном или нормализованном состоянии		В наклепанном состоянии	
	Расположение линии гиба			
	Поперек волокон проката	Вдоль волокон проката	Поперек волокон проката	Вдоль волокон проката
	Радиус гиба x S_o			
Медь отожженная	0,1		1,0	2,0
Латунь Л68		0,5	0,4	0,8
Сталь 08КП		0,4	0,5	1,0
Стали 10-20		0,5		
Стали 25-30	0,2	0,6	0,8	1,2
Стали 35-40	0,3	0,8	1,0	1,5
Стали 45-50	0,5	1,0	1,2	1,8
Стали 55-60	0,7	1,2		2,0
12Х18Н10Т	1,2	2,0	2,0	3,0
Д16АМ		1,8	1,8	2,6
Д16АТ	2,5	3,5	3,5	4,5
МА1М в хол.сост.	-	-	6,0	8,0
МА8М в хол.сост.			5,0	6,0

Табличные значения r_{min} являются теоретическими и для практики должны быть увеличены в 1,5-2,5 раза.

Минимальная высота отгибаемого борта h_{min} (из условия соотношения жесткости борта и сопротивления течению эластичной среды и затеканию ее под отгибаемый борт) можно определить по формулам из таблицы 5.

Где α – угол гиба; K, n – коэффициенты степенной аппроксимации диаграммы истинных напряжений; p – максимальное давление, которое может быть достигнуто в контейнере 10 кг/мм^2.

Таблица 5. Определение высоты борта

Определяемая величина	Расчетная формула	Примечание
	С учетом упрочнения материала	
Минимальная высота отгибаемого борта	$h_{\min} = \sin a \sqrt{\frac{2KS^{2+n}}{r^n (2+n) 2^{1+n} p} + rb(1-\cos a) + 0{,}5S}$	K,n – константы данного материала
	$h_{\min} = \sqrt{\frac{KS^2}{r^n (2+n) p}} + 4S$	Для α = 90о При r = 3S
	Без учета упрочнения материала	
	$h_{\min} = \sin a \sqrt{\frac{\sigma_b S^2}{2p} + rb(1-\cos a) + 0{,}5S}$	Для приближенного расчета
	$h_{\min} = \sqrt{\frac{\sigma_b S^2}{2p}} + 4S$	Для приближенного расчета при r = 3S; α = 90о

2. Определение размеров заготовки

Длина развертки lз определяется по формуле

$$l_з = \Sigma l_i + \Sigma \frac{\pi \alpha}{180}(r + \chi S),$$

Σl_i = сумма прямых участков.

χ - коэффициент, учитывающий особенности влияния эластичной среды на процесс гибки, определяется по таблице 6.

Таблица 6. Определение коэффициента χ

r_b	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10	12	15	20
χ	0,3	0,335	0,36	0,383	0,4	0,415	0,43	0,455	0,467	0.483	0,485	0,5

3. Определение необходимого для гибки давления ведется по формулам, приведенным в таблице 7.

Таблица 7. Определение давления гибки

Определяемая величина	Расчетная формула	Примечание
Необходимое давление для гибки прямолинейного борта	$p = \frac{2\sin^2 aKS^{2+n[}}{r^n(2+n)2^{1+n}[xp - к(1-cosa) - 0{,}5S]^2}$	
	$p = \frac{2KS^{2+n}}{r^n(2+n)2^{1+n}(h-r-0{,}5S)^2}$	При α = 900
	$p = \frac{\sigma_b S^2 \sin^2 a}{2[h-r(1-\cos a)-0{,}5S]^2}$	Упрощенная формула для предварительных расчетов
	$p = \frac{\sigma_b S^2}{2[h-r-0{,}5S]^2}$	При α = 900

4. Определение размеров формблока (рис.47):

- высота формблока $h_ф = h + a - S$;
- припуск на высоту формблока при гибке прямолинейных бортов a = 8-10 мм;
- корректировка угла гиба у формблока определяется по формулам упругой отдачи при гибке.

Таблица 8. Определение угла упругой отдачи

Определяемая величина	Расчетная формула	Примечание
Угол упругой отдачи γ	$\gamma = E'(\frac{2r}{S}+1)^{1-n}a_0$	Для прямолинейных бортов
	$\gamma = \frac{3\sigma_b}{E}(\frac{r}{S}+0{,}5)a_0$	При $\frac{r}{S} \le 7-10$
	$\gamma = 945\frac{\sigma_b}{E}$	При $\frac{r}{S} = 3; a = 90^0$

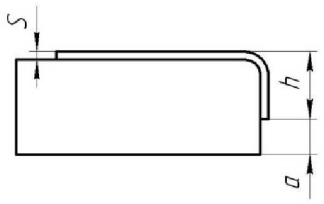


Рис. 47. Схема гибки

5. Определение размеров эластичной подушки:

Размер эластичной подушки (внутренний диаметр контейнера) определяется из условия свободного размещения на ней заготовки (рис.48). Зазор между стенкой контейнера и заготовкой принимается равным половине высоты формблока.

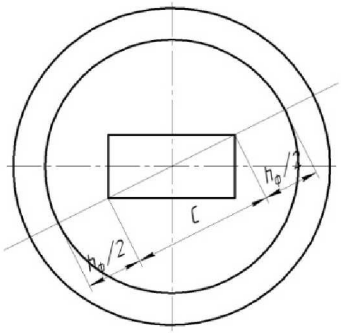


Рис. 48. Размер эластичной подушки

Внутренний диаметр контейнера $D_{вн} = C + h_ф$.
Высота эластичной подушки $h_г = 3\ h_ф$.

6. Определение исполнительных размеров контейнера:

- глубина заходной части контейнера
$h_к = h_п + h_{пр} + C_к$; $h_{пр}$ – высота прокладки 5-10 мм;
$C_к$ – заходная фаска, выбирается в пределах 2×45°…5×45°;
- толщина стенки контейнера

$$t = \frac{p \cdot D}{2\sigma_{0,2}} \cdot n,$$

n – коэффициент запаса 3 ÷ 6.

2.4.1.2. Пример расчета

Требуется рассчитать параметры технологического процесса гибки эластичной средой при изготовлении детали, показанной на рис. 49.

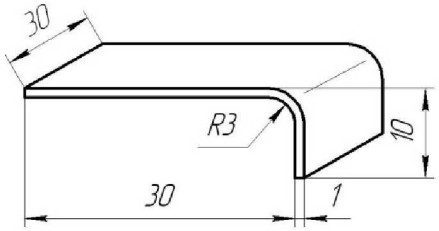


Рис.49. Деталь для расчета

Материал детали Д16АМ. σ_b= 20кг/мм^2, $\sigma_{0.2}$=10кг/мм^2, δ=0,1,
E= 7000кг/мм^2.

1. Оценка технологичности детали

1.1. Минимальный радиус гиба.

Из таблицы 4 находим $r_{\min} = 1{,}2 \cdot S_0 = 1{,}2мм$ (поперек волокон),

вдоль волокон $r_{\min} = 1{,}8 \cdot S_0 = 1{,}8мм$.

Для практических целей минимальный радиус гиба принимаем равным

поперек волокон $r_{\min} = 2{,}4мм$;

вдоль волокон $r_{\min} = 3{,}6мм$.

Деталь технологична при условии раскроя заготовки из листа таким образом, чтобы линия гиба была поперек волокон.

1.2. Минимальная высота отгибаемого борта.

Выбираем схему гибки в закрытом объеме.

Используем для оценочных расчетов формулу

$h_{\min} = \sqrt{\frac{\sigma_b \cdot S^2}{2 \cdot P_{\max}}} + 4 \cdot S = \sqrt{\frac{20 \cdot 1^2}{2 \cdot 10}} + 4 \cdot 1 = 5мм$ – расчет показывает, что деталь технологична.

2. Определим размеры заготовки (рис. 50) по формуле

$l_з = \sum l_i + \sum \frac{\pi \cdot \varphi}{180}(r_b + \chi \cdot S)$, $\chi = 0{,}383$.

Разобьем деталь по участкам:

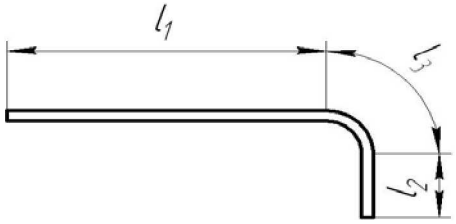


Рис. 50. Определение длины заготовки

$$l_3 = \frac{2\pi(r + \frac{1}{2}\cdot S + \chi \cdot S)}{4} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot (3 + 0{,}5 + 0{,}383)}{4} = 6{,}1мм,$$

$$l_з = 27 + 6{,}1 + 6 = 39{,}1мм.$$

3. Определим потребное давление гибки по формуле

$$p = \frac{\sigma_b \cdot S^2}{2 \cdot (h - r - 0{,}5 \cdot S)^2} = \frac{20 \cdot 1^2}{2 \cdot (10 - 3 - 0{,}5)^2} = 0{,}24кг / мм^2.$$

4. Определим усилие пресса по формуле

$$P = K_{тр} \cdot p \cdot F,$$

где F – площадь рабочей поверхности эластичной среды.

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{30^2 + 39^2} = 49{,}2мм.$$

$$h_ф = h + a - S = 10 + 10 - 1 = 19мм.$$

$$D_{вн} = C + h_ф = 49{,}2 + 19 = 68{,}2мм.$$

$$P = 0{,}24 \cdot \frac{\pi \cdot 68{,}2^2}{4} \cdot 1{,}3 \approx 1139кг.$$

5. Определим угол пружинения детали, который следует учесть в форме формблока

$$\gamma = 945 \cdot \frac{\sigma_b}{E} = 945 \cdot \frac{20}{7000} = 2°42'.$$

6. Определим основные размеры контейнера (рис. 51):

$$C_к = H + S + C_ф = 19 + 1 + 3 = 23мм;$$

$$h_п \geq (4 \div 5)h_ф = 60мм.$$

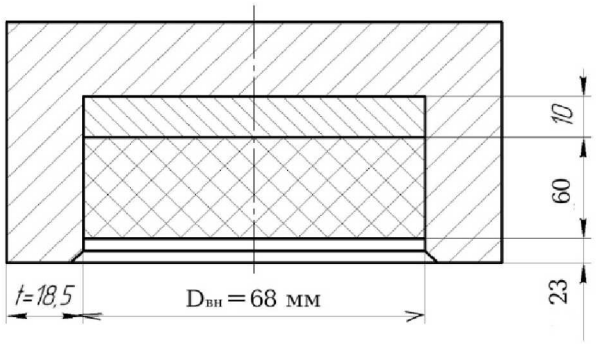


Рис. 51. Размеры контейнера

2.4.2. Рельефная формовка

Второй по распространенности формообразующей операцией, осуществляемой эластичной средой, является операция рельефной формовки. Рельефная формовка – процесс получения на плоской заготовке различного вида местных углублений, выступов, ребер жесткости, сферических или другой формы выдавок, художественного рельефа.

Существуют две технологические схемы рельефной формовки: по жесткой матрице и по жесткому пуансону (рис. 52).

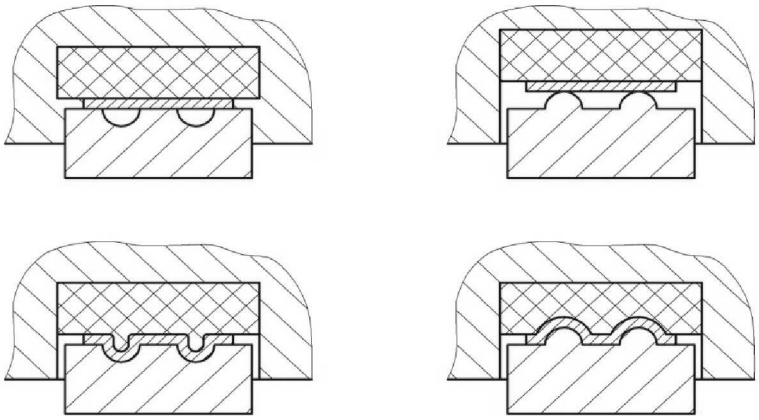


Рис. 52. Схемы рельефной формовки:
а) по жесткой матрице; б) по жесткому пуансону

При использовании первой схемы в начальный момент штамповки заготовка по всей плоскости плотно прижимается к матрице и последующая формовка рельефа осуществляется за счет утонения материала в очаге деформации.

Вторая схема обеспечивает возможность подтяжки материала заготовки в очаг деформации, снижает величину утонения, но при этом возникает вероятность потери заготовкой устойчивости (гофрообразование), что значительно ограничивает технологические возможности процесса (формовка только мелкого рельефа).

В отличие от инструментальных методов рельефной штамповки, где заготовка испытывает знакопеременную неоднородную деформацию или где требуется применение сложных штампов с прижимом, при штамповке эластичной средой деформация развивается более равномерно, последовательно, что снижает уровень возникающих в детали остаточных напряжений, приводит к меньшему ее короблению (рис.53).

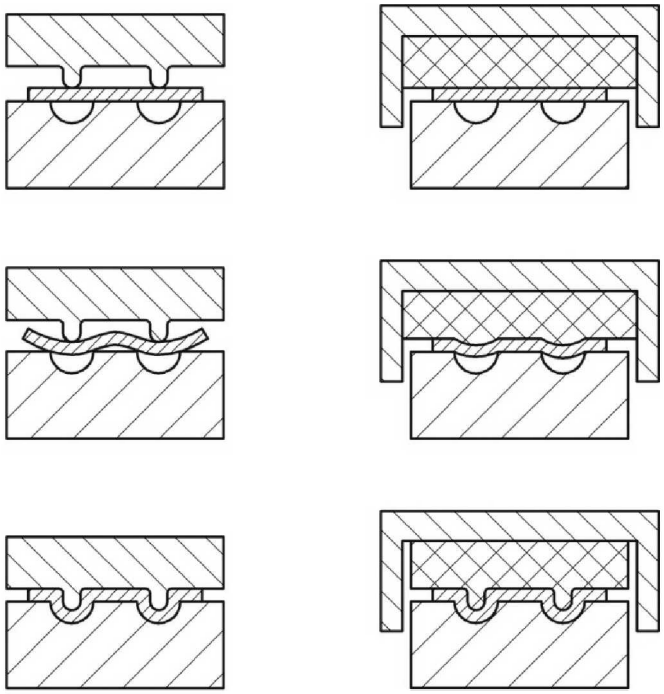


Рис. 53. Последовательность деформирования заготовки при выполнении операции рельефной формовки: а) в инструментальном штампе; б) эластичной средой

При проектировании технологического процесса рельефной формовки определяется только один параметр – потребное давление. Так, для формовки рифтов (рис. 54 а) сферической или цилиндрической форм необходимое давление определяется по формуле Лапласа

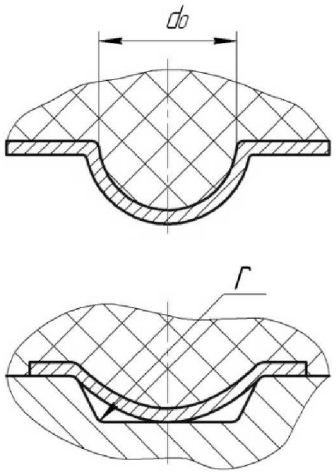
$$p = \frac{2\sigma_в \cdot S_0}{d_0}, \qquad (9)$$

Для гарантии полного оформления геометрии рифта предел текучести в формуле Лапласа заменен на предел прочности.

При рельефной формовке рифта другой формы (конфигурации), например трапецеидальной (рис.54 б), в приведенную выше формулу вместо d_0 необходимо подставить минимально оформляемый радиус в заданной геометрии рифта.

$$p = \frac{\sigma_в \cdot S_0}{r_{\min}}. \qquad (10)$$

При оформлении сложного рельефа, в расчетную формулу потребного давления также подставляется минимальный радиус рельефа.



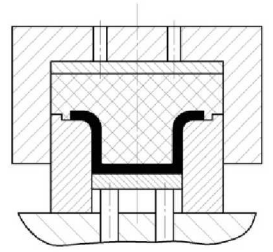
а)

б)

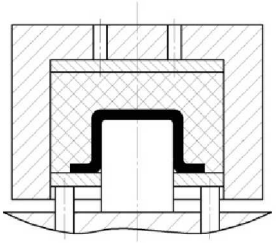
Рис. 54. Формовка рифта сферической (а), трапецеидальной (б) формы

2.4.3. Вытяжка эластичной средой

В последнее время, особенно с использованием специализированного оборудования, получили распространение операции вытяжки с использованием эластичных сред.



а)



б)

Рис. 55. Вытяжка эластичной средой:
а) по жесткой матрице; б) по жесткому пуансону

Вытяжка листового материала, как и рельефная формовка может осуществляться по двум схемам: эластичной матрицей по жесткому пуансону (рис. 55 б) и, наоборот, эластичным пуансоном по жесткой матрице (рис. 55а). При этом могут использоваться как подвижные, так и неподвижные прижимы.

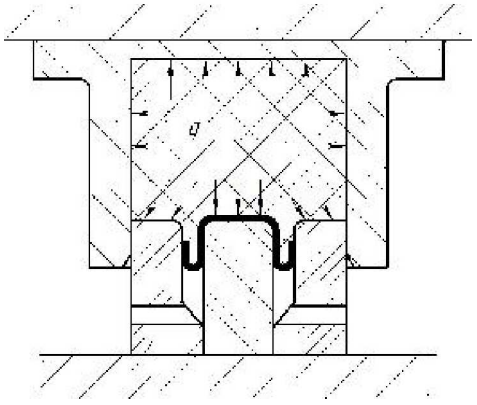


Рис. 56. Схема процесса вытяжки по жесткому
пуансону с неподвижным прижимом

В случае применения неподвижного прижима эластичная матрица, деформируя листовую заготовку, образует своеобразное «перетяжное ребро», которое увеличивает растягивающие меридиональные напряжения, действующие во фланце заготовки (рис. 56).

Вытяжка детали из листовой заготовки по схеме с подвижным прижимом происходит следующим образом. При опускании контейнера, прикрепленного к ползуну гидравлического пресса, эластичный блок приходит в соприкосновение с плоской заготовкой, размещенной на прижимном кольце. Преодолевая сопротивление гидравлической подушки пресса, которое передают толкатели, эластичная среда деформирует заготовку, обтягивая ее вокруг пуансона и осуществляя, таким образом, процесс вытяжки.

Рассмотренный процесс вытяжки жестким пуансоном по эластичной матрице обладает значительно большими возможностями, чем вытяжка в инструментальном штампе, повышая коэффициенты вытяжки на 15-20 %. При этом значительно может быть уменьшен радиус между дном и стенкой (до 2S).

Увеличение степени деформации, получение большей высоты детали можно объяснить следующими причинами:

- уменьшением сопротивления изгибу (в начальный момент вытяжки радиус скругления имеет наибольшую величину);
- наличием полезных сил трения между пуансоном и заготовкой, разгружающих опасное сечение;
- отсутствием трения между заготовкой и эластичной средой в связи с почти одинаковым их перемещением;
- действием давления эластичной среды на торцевую поверхность фланца, что разгружает опасное сечение от растягивающих напряжений (рис. 57).

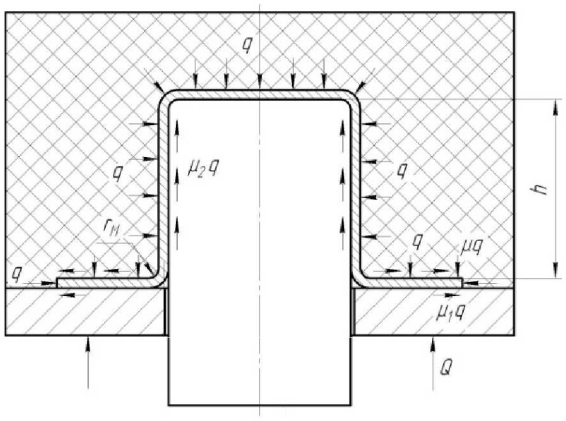


Рис. 57. Схема действия сил и напряжений при вытяжке эластичной матрицей

Опасное сечение, а следовательно, участок наибольшего утонения стенки заготовки при вытяжке эластичной средой по жесткому пуансону удаляется от донной части и приближается к ее фланцу.

Давление эластичной среды q в процессе вытяжки должно плавно возрастать: в начальный момент рекомендуется создавать давление равное 1÷1,5 МПа для деталей из легких сплавов, 5-10 МПа для деталей из сталей, а затем плавно достигнуть величины 25-40 МПа и 70-100МПа соответственно.

Высокие начальные давления могут привести к локализации пластической деформации заготовки между пуансоном и прижимом, недопустимому утонению и даже обрыву.

При вытяжке деталей по схеме «эластичным пуансоном по жесткой матрице» форма матрицы соответствует конфигурации детали. Процесс не требует дорогостоящей оснастки. Поэтому с экономической точки зрения довольно эффективен. Однако с технической точки зрения не обеспечивает повышения предельных возможностей и имеет ряд недостатков. Например, неустойчивое по периметру течение фланца в различных участках из-за анизотропии механических свойств, неодинаковости условий трения, что может привести к односторонней утяжке фланца, большое утонение стенок и резко выраженная разнотолщинность.

2.4.4. Формовка полых заготовок

Большая номенклатура изделий машиностроения изготавливается из полых заготовок: труб, конусов, оболочек, вытянутых стаканов и коробок и других форм [16].

Для изготовления таких деталей используются операции формовки, осуществляемые эластичными средами по технологическим бесконтейнерным закрытым технологическим схемам (рис. 58).

Во всех приведенных схемах эластичный блок размещается внутри полой заготовки. Снаружи расположена соответствующая разъемная или неразъемная матрица. Формообразование заготовки осуществляется одно - или двухсторонним сжатием эластичного блока, обеспечивая его деформирование в закрытом объеме.

Одной из особенностей штамповки полых заготовок эластичными средами является влияние сил трения между эластичной средой и заготовкой на процесс деформирования. Если коэффициент трения металла по металлу имеет порядок 0,1, то эластичной среды по металлу – достигает значения 0,7. За счет такого значительного трения эластичная среда, перемещаясь, влечет за собой в очаг деформации материал заготовки, изменяя схему его напряженного состояния. Как правило, создается дополнительное сжимающее осевое напряжение, что создает условия повышения технологической пластичности, то есть предельных возможностей процессов.

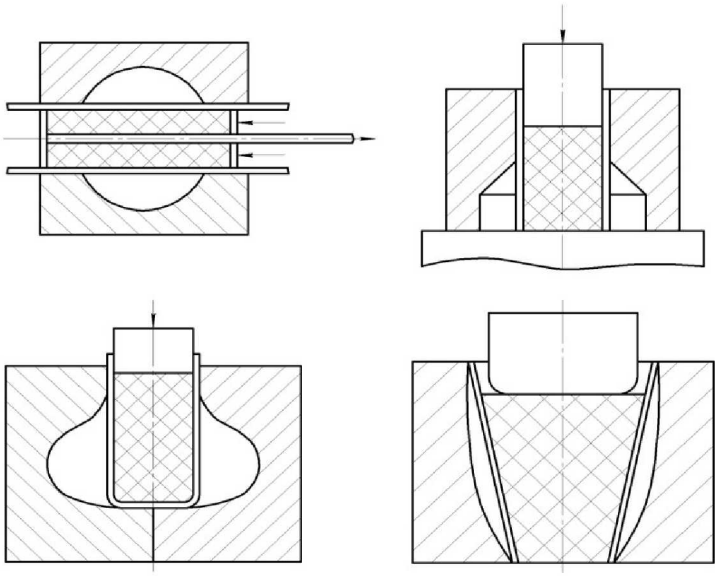


Рис. 58. Схемы формовки полых заготовок

С другой стороны, это может вызвать осевую потерю устойчивости (складки). Если возникает такая опасность, следует нанести на внутреннюю поверхность заготовки смазку.

Потребное давление для формообразования полых заготовок рассчитывается по формуле Лапласа

$$p = \frac{2S_0\sigma_в}{D}, \qquad (11)$$

где D – минимальный диаметр исходной заготовки.

Формообразующие операции штамповки эластичными средами применяются для деформирования листовых и полых заготовок из алюминиевых сплавов толщиной до 5 мм, низкоуглеродистых сталей до 1,8 мм, коррозионно-стойкой стали до 1,5 мм, титановых сплавов до 1,2 мм. Габаритные размеры плоских заготовок в пределах 500х500 мм, полых – диаметром до ∅ 500 мм.

2.4.5. Гибка-формовка прессованных профилей

Оригинальной является технология штамповки прессованных профилей эластичными средами, разработанная специалистами СГАУ [17,18].

Штамповку деталей из прессованных профилей эластичными средами производят в универсальных щелевых контейнерах с прямоугольной в плане формой рабочей камеры (рис. 59).

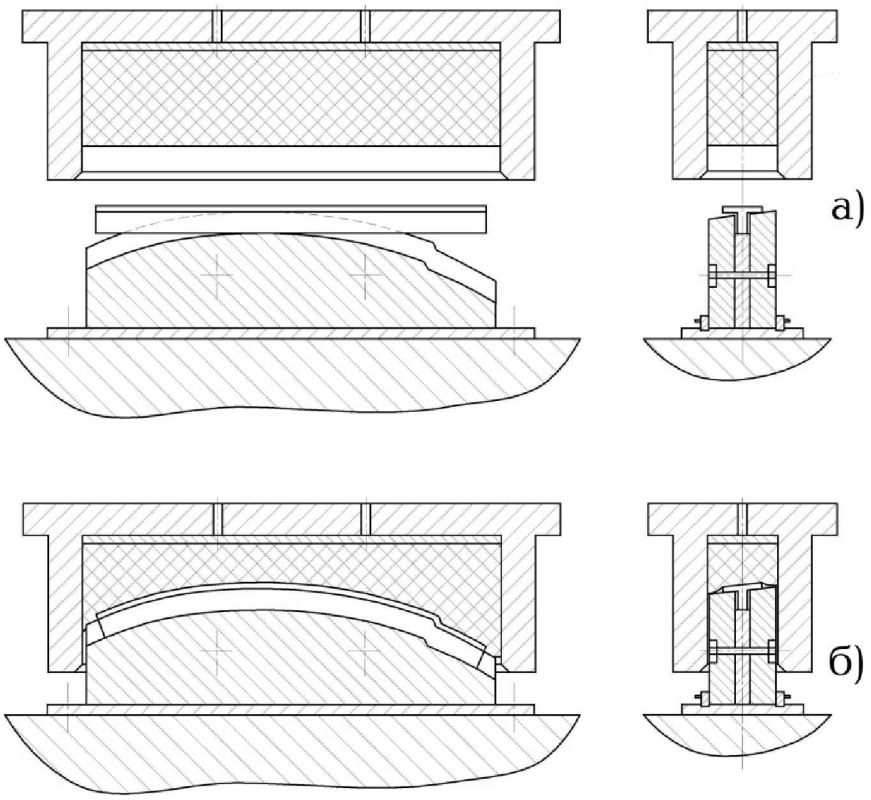


Рис. 59. Гибка прессованного профиля эластичной средой:
а) исходное; б) конечное положение

В качестве жесткого инструмента при штамповке деталей из прессованных профилей используются формующие оправки. При движении контейнера полиуретан, действуя на полку профильной заготовки, производит изгиб, малковку и подсечку.

Под действием давления эластичной среды профильная заготовка постепенно изгибается по радиусу формующей оправки. При достаточном давлении эластичной среды профильная заготовка полностью прижимается к поверхности оснастки

Малковка прессованного профиля – это операция изгиба его стенки относительно полки (рис. 60).

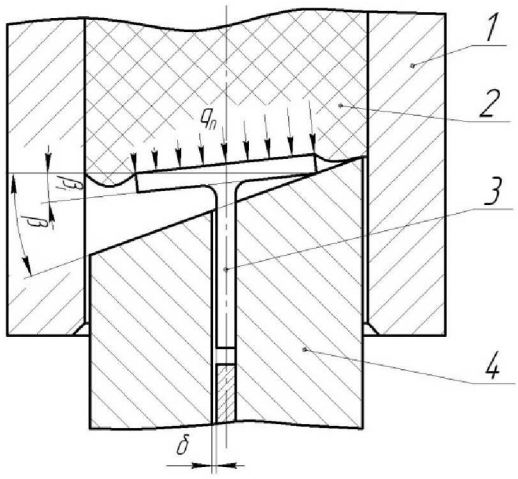


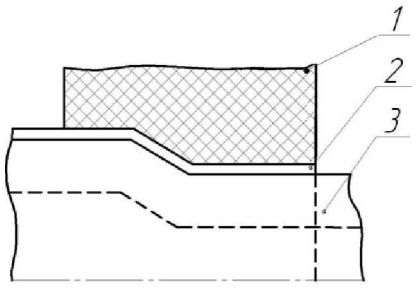
Рис. 60. Схема малковки таврового профиля полиуретаном:
1 – контейнер; 2 – эластичная среда; 3 – профиль; 4 – оправка

Подсечка прессованных профилей (рис.61) – параллельное смещение одной части профиля относительно другой в результате местного изгиба заготовки под давлением эластичной среды по оправке, имеющей соответствующую конфигурацию.

При необходимости операции гибки, малковки и подсечки могут осуществляться одновременно.

В качестве жесткого инструмента используются сменные формующие оправки, которые являются носителями формы и размеров деталей.

Основными параметрами процессов являются деформирующее усилие и упругая отдача [17,18].



1 – полиуретан, 2 – профиль, 3 – оправка

Рис. 61. Схема процесса подсечки прессованных профилей эластичной средой

Приведенные технологии штамповки эластичными средами применяются для изготовления деталей из тонкостенных прессованных профилей с односторонним расположением полки Т, Г, П-образных и других сечений из алюминиевых сплавов. Длина таких деталей может достигать 1000 мм.

Примеры деталей, изготовленных из прессованных профилей с помощью эластичных сред, приведены на рис.62.



Рис. 62. Примеры деталей, изготовленных
из прессованных профилей

Основные преимущества такой технологии: сокращение расхода материала за счет уменьшения, а в ряде случаев полной ликвидации технологических припусков; ручных доводочных работ, трудоемкости изготовления.

2.5. Контейнеры для штамповки эластичными средами

Контейнер для штамповки эластичной средой представляет собой сосуд под высоким давлением (до 1000 атм). Поэтому к ним предъявляются повышенные требования по технике безопасности.

Как наиболее прочные получили наибольшее распространение контейнеры цилиндрической формы.

Полиуретановые подушки запрессовываются во внутреннюю полость контейнера с натягом 0,5 … 1,0 мм. Пластина, расположенная в донной части контейнера, служит для удобства удаления изношенной подушки (блока) из

него. С этой целью в дне контейнера предусматривают отверстия, через которые подушку выпрессовывают с помощью штырей. Внутренний диаметр контейнеров, применяемых на производстве, составляет от 30 до 560 мм и рассчитан на давление до 1000 кг/см^2.

Контейнеры рекомендуется изготавливать из стали 40Х, 30ХГСА с твердостью после термообработки HRc 28…32 ед.

Расчет контейнера на прочность ведется по формуле Лапласа для толстостенного цилиндра, где определяется то максимальное давление, которое выдерживает кольцо без следов пластической деформации. Им определяется толщина стенки, при давлении p = 1000 атм, при которой кольцо не переходит в пластическое состояние.

$$t = \frac{pD_{вн}}{2\sigma_{0,2}} n, \qquad (12)$$

где n – коэффициент запаса, обычно принимается равным 3-4.

Для штамповки узких длинномерных изделий применяются контейнеры щелевого типа. Такие контейнеры вдоль длинной стороны подвержены большим деформациям. Для предотвращения опасных деформаций применяются дополнительные меры повышения их прочности. Например, для этой цели используются силовые упоры (рис.63).

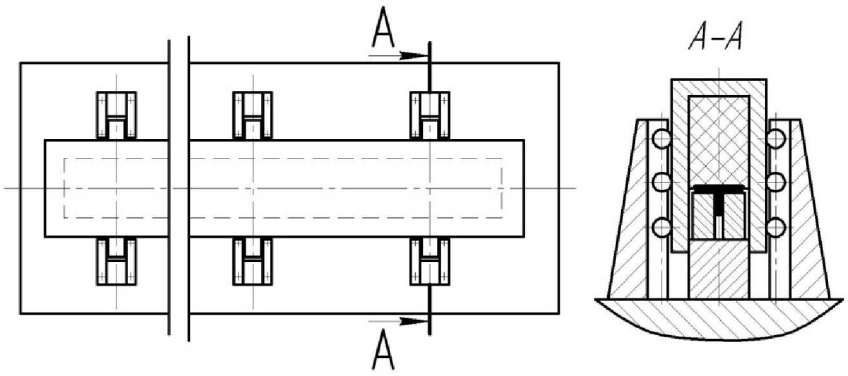


Рис. 63. Щелевой контейнер, усиленный боковыми упорами

Могут быть использованы конструкции контейнеров с бандажированной рабочей камерой с полуцилиндрическими вставками. Специальные повышения прочности позволили создать надежные щелевые конструкции с рабочей зоной длиной 300, 500 и 700 мм и шириной 50 мм.

2.6. Оборудование, применяемое при штамповке эластичными средами

Для штамповки эластичными средами применяют обычные гидравлические прессы, а для штамповки крупногабаритных деталей – мощные гидравлические прессы с выдвижными столами длиной до 4 метров и шириной до 2 метров. Необходимость применения при штамповке листовых деталей прессов большой мощности можно отнести к недостаткам этого метода.

Для групповой штамповки используются уникальные гидравлические прессы (рис. 64) усилием, например, 5000 т и более. Такие прессы снабжены несколькими подвижными столами, что повышает коэффициент использования прессов, поскольку столы последовательно подаются под пресс. В то время пока совершается рабочий ход пресса, на других столах производятся подготовительные работы: съем и размещение новых заготовок или смена инструмента.

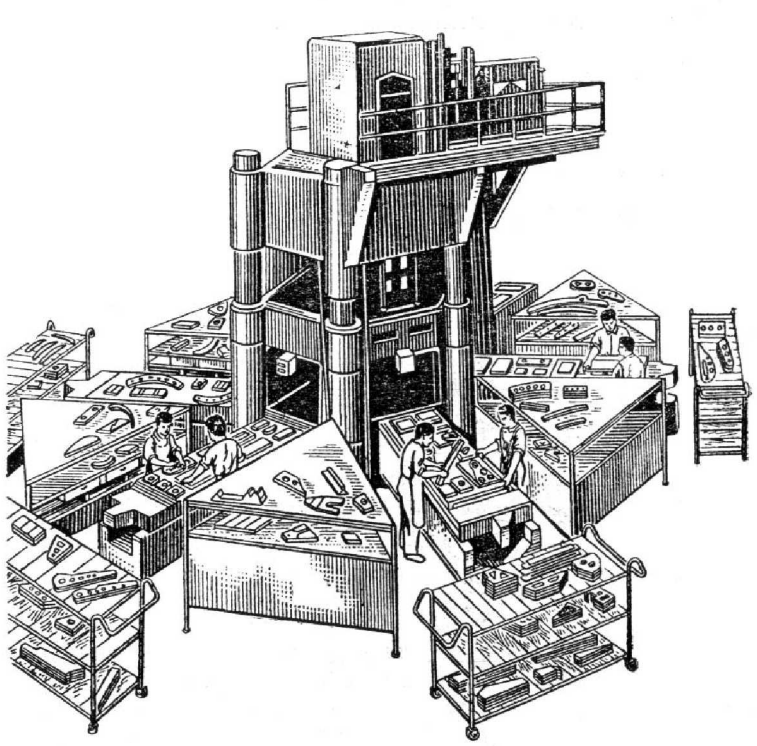


Рис. 64. Планировка гидравлического пресса
с 6 подвижными столами

В последнее время шведской фирмой для штамповки (вытяжки) эластичными средами создано специализированное оборудование – прессы QAB-32 с максимальным усилием 3200 т, с диаметрами рабочих диафрагм сменных формообразующих агрегатов пресса 560, 630 и 800 мм и QRD-600 с максимальным усилием 60000 т.

Пресс QAB-32 предназначен в основном для глубокой вытяжки эластичной средой. Оригинальность его – в особой конструкции предварительно напряженной станины. Колонны и поперечины стянуты проволокой. Применение напряженной проволоки обусловливает низкий вес станины, компактность конструкции. Пресс снабжен двумя цилиндрами: верхним и нижним, что обеспечивает подвижность пуансона, прижима, и четырьмя гидроподъемниками. Нижний торец верхнего цилиндра закрыт диафрагмой. Маслокамера заполнена касторовым маслом.

Основные характеристики пресса QAB-32:

Максимальное усилие 3200 т
Габаритные размеры: 7000x1900x1200 мм
Диаметр плунжера – 900 мм
Давление в гидросистеме – 500атм
Максимальный ход плунжера – 720 мм (вверх); 315 мм (вниз)
Максимальная скорость рабочего хода – 150 мм/сек.

Пресс QRD-600 (рис. 65) предназначен для штамповки эластичной средой крупногабаритных деталей. Пресс представляет собой толстостенный горизонтальный цилиндр, образованный напряженной стальной проволокой и двумя ригелями.

Рабочее пространство пресса представляет собой туннель прямоугольного поперечного сечения. Сверху располагается стальная плита, к которой крепится маслокамера с тонкой полиуретановой диафрагмой. Под маслокамерой располагается толстая полиуретановая подушка.

В нижней части рабочего пространства предусмотрен выдвижной стол, на котором размещаются инструмент и заготовки.

Маслокамера наполняется маслом под высоким давлением. Диафрагма расширяясь, оказывает давление на полиуретановую подушку. Осуществляется рабочий цикл.

Некоторые характеристики пресса QRD-600:

Расчетное усилие – 60000 т
Максимальное рабочее давление в маслокамере – 1000 атм.
Длина – 5120 мм
Наружный диаметр – 3275 мм
Число подвижных столов (лотков) – 4

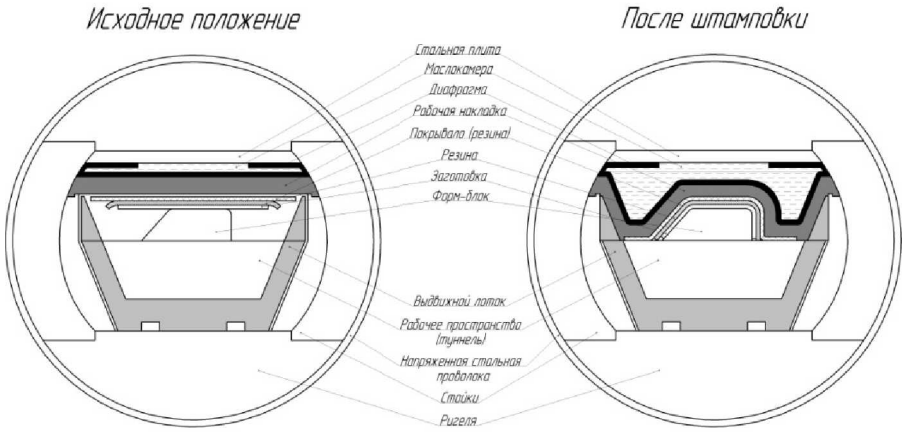


Рис. 65. Конструкционная схема пресса QRD-600

Планировка всего технологического комплекса, включая подвижные столы, гидронасосы, пульт управления и другие элементы приведена на рис. 66.

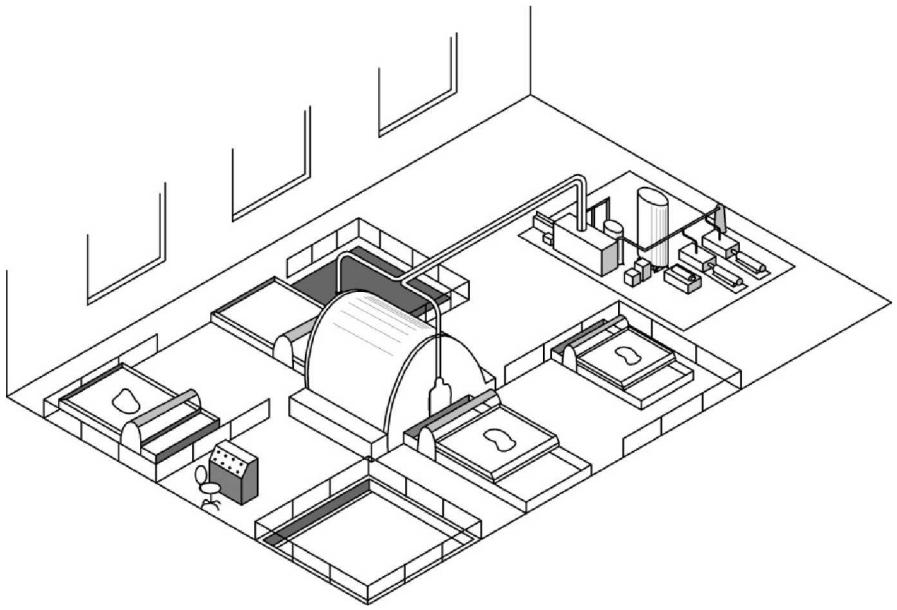


Рис. 66. Компоновочная схема технологического комплекса QRD-600

3. ПРОЦЕССЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Температурно-скоростные режимы деформирования подразделяют специальные виды листовой штамповки на статические и динамические.

В последние годы получают развитие динамические методы, обладающие большими технологическими возможностями, например, взрывная, электрогидравлическая и магнитно-импульсная обработки. Кроме того, они получили также название высокоскоростных, импульсных, высокоэнергетических. Такие названия, описывая одни и те же методы, характеризуют их различными параметрами обработки: скоростью – высокоскоростные, энергией – высокоэнергетические, коротким силовым воздействием – импульсные.

Технологическая схема взрывной обработки приведена на рис. 67.

При подрыве взрывчатого вещества (ВВ) ударная волна, достигнув заготовки, деформирует ее.

При электрогидравлической обработке происходит электрический пробой межэлектродного промежутка в воде. Образовавшийся канал разряда и мгновенное испарение жидкости порождают давление, деформирующее заготовку (рис. 68).

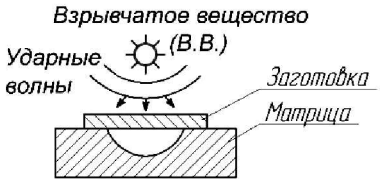


Рис. 67. Схема взрывного воздействия на деформируемую заготовку

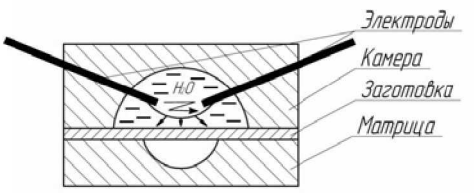


Рис. 68. Схема электрогидравлического эффекта

Магнитно-импульсная обработка основана на взаимодействии магнитных полей двух проводников, по которым пропускается импульсный ток во встречном направлении.

Взаимодействие магнитных полей порождает электромагнитные силы отталкивания, деформирующие металл. Источником магнитного поля является индуктор-катушка, на которую разряжается батарея конденсаторов (рис. 70).

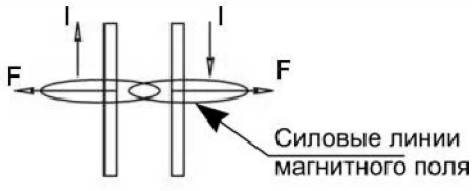


Рис. 69. Электродинамические усилия F, возникающие между двумя проводниками с током I

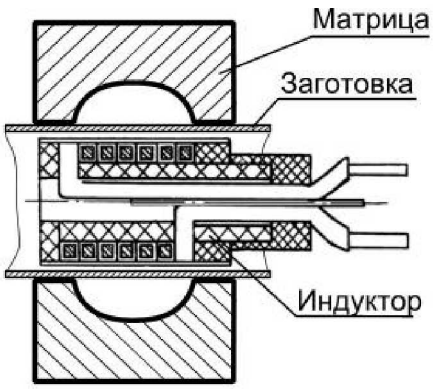


Рис. 70. Схема магнитно-импульсной обработки

Все эти три динамических метода листовой штамповки характеризуются минимальным временем силового воздействия на заготовку τ (от микро- до миллисекунд (10^{-3} – 10^{-5} с)) и высокими скоростями деформирования V м/с или деформации $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / d\tau$.

В таблице 9 приведены сопоставительные значения этих параметров при статических и динамических видах листовой штамповки.

Таблица 9. Значения параметров деформирования

Вид нагружения	Параметры деформирования		
	Время деформирования, τ, с	Скорость деформирования, V м/с	Скорость деформации, $\dot{\varepsilon}$,1 / с
Статическое	До 0,5 – 1,0	До 1,0 – 3,0	10-6 – 10-3
Динамическое	10-3 – 10-5	30 – 250	103 – 106

Из таблицы видно, что параметры статического и динамического деформирования металлов отличаются на порядки.

4. ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ

Особенностью динамического деформирования являются возникающие в металле волновые процессы.

Представим материал деформируемой заготовки в виде жестких элементов (сфер) с упругими связями (пружинами) между ними.

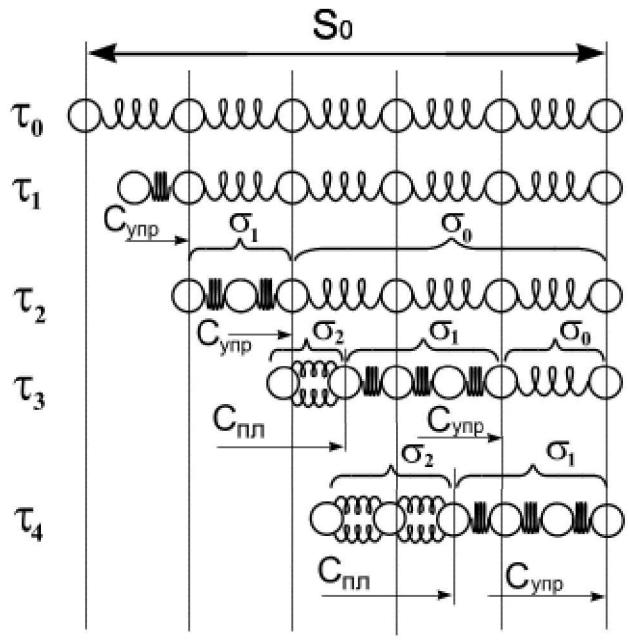


Рис. 71. Схема распространения упругих и пластических волн напряжений и деформаций в материале заготовки при динамическом нагружении. S_0 – толщина заготовки

В начальный момент времени τ_o в заготовке отсутствуют напряжения. Приложим к заготовке импульс давления. Это может быть как активная сила, так и, например, удар заготовки по матрице.

В первый момент времени τ_1 крайний элемент воспринял нагрузку, переместился в новое положение и сжал крайнюю пружину. Образовался фронт возмущения. В следующий момент времени τ_2 возмущение, представляющее собой фронт волны, сжало следующую пружину. В материале заготовки возникли области с различными напряжениями σ_1 и σ_o. Если возникшие напряжения σ_1 меньше предела текучести, то по материалу заготовки распространяется фронт упругой волны $C_{упр}$. Для одноосного напряженного состояния (стержень) скорость упругой волны определяется выражением

$$C_{упр} = \sqrt{E / \rho}\,,$$

где E – модуль упругости материала заготовки, ρ – его плотность.

Для большинства металлов $C_{упр}$ составляет 3000 – 6000 м/с.

За время деформирования при статическом нагружении упругая волна многократно пробежит по заготовке, выравнивая все напряжения. Поэтому при статическом деформировании волновые эффекты не учитываются.

Если сила удара будет такой ($\tau_з$), что возникающие в заготовке напряжения превышают предел текучести, то вслед за упругой волной по материалу заготовки начнет распространяться пластическая волна (изобразим ее двумя пружинами) со скоростью

$$C_{пл} = \sqrt{\frac{1}{\rho}\frac{d\sigma}{d\varepsilon}}\,.$$

Из формулы видно, что скорость пластической волны меньше скорости упругой волны, причем скорость пластической волны переменна и уменьшается с увеличением степени деформации.

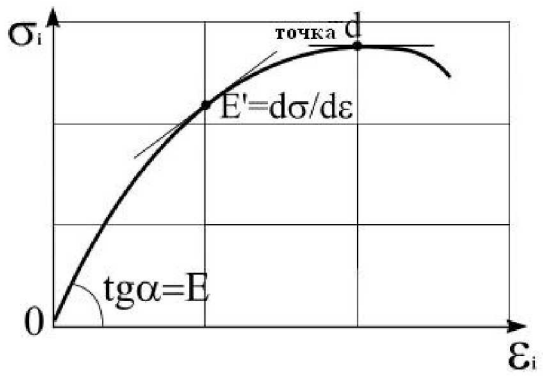


Рис. 72. Кривая упрочнения $\sigma_i(\varepsilon_i)$; переменный модуль упругости: $E` < E$ ; в точке $d$ – $E`=0$

И в точке d скорость $C_{пл} = 0$ ($d\sigma/d\varepsilon = 0$). В этой точке происходит разрушение образца.

В образце могут возникнуть уже три области напряжений: σ_o, σ_1 и σ_2.

Упругая волна, распространившись до свободной границы, отразится обратной волной растяжения.

В какой-то момент времени обратный фронт волны растяжения встретится с фронтом сжатия пластической волны. Произойдет их взаимодействие, которое приведет к снижению уровня напряжений во фронте пластической волны и за ним.

Далее в зависимости от силы удара возможно либо продолжение движения фронта пластической волны, но с меньшей амплитудой, либо перерождение ее в упругую волну.

Таким образом, если удар заготовки о матрицу будет упругим, то есть пластической волны не возникло, то конечный зазор между матрицей и заготовкой будет определяться упругим пружинением и величиной отскока (рис. 73).

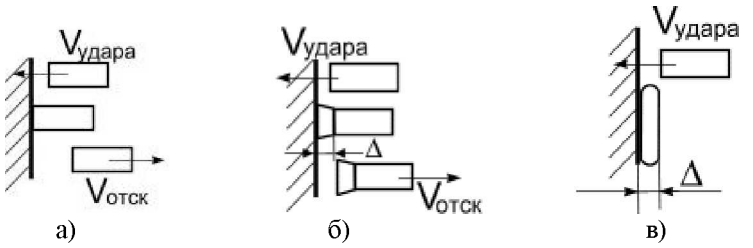


Рис. 73. Возможные схемы соударения заготовки с преградой (матрицей): а) упругое соударение; б) упруго-пластическое соударение; в) пластическое соударение

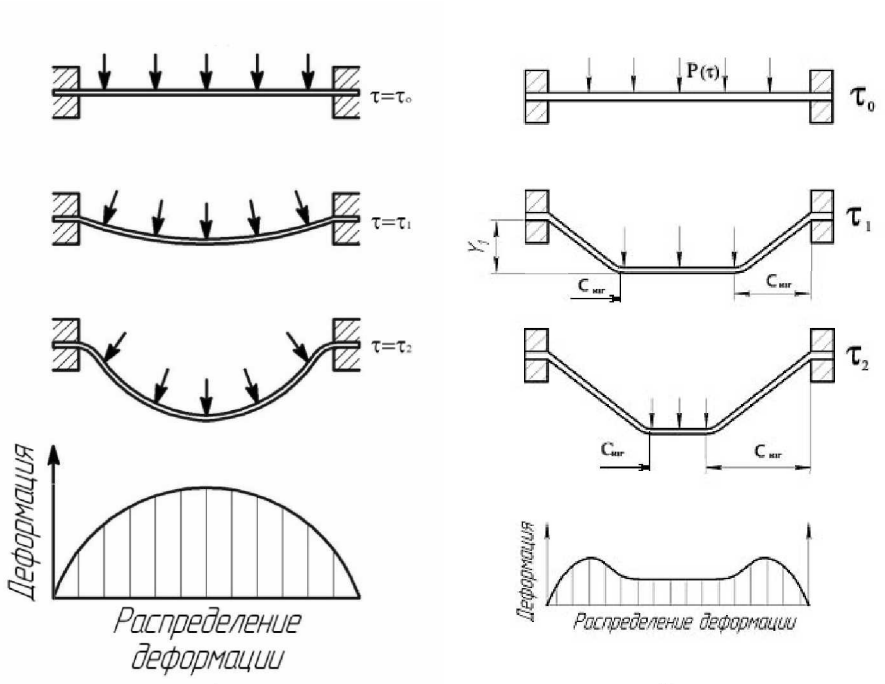
Если же удар будет полностью «пластическим», то заготовка, подобно пластилину, «прилипнет» к матрице. Пластическая волна «нейтрализует» и пружинение, и отскок.

Этим можно объяснить, например, более высокую точность отштампованных деталей при импульсных методах обработки.

Рассмотренные волны напряжений и деформаций являются продольными по отношению к направлению приложения нагрузки. Существуют также изгибные (поперечные) волны. Если закрепить полосу и приложить к ней поперечную статическую нагрузку P, то характер развития деформаций примет вид, изображенный на рис. 74 а, с максимальным прогибом в центре.

При динамической нагрузке центральная часть полосы деформируется как бы независимо, не испытывая влияния защемления по краям. От защемления распространяются изгибные волны напряжений, меняющие характер деформирования, конечную форму детали, распределение деформаций (рис. 74 б).

Понимание волновых эффектов при динамическом деформировании имеет важное значение при проектировании технологических процессов, оснастки, для обеспечения высокого качества готовой продукции.



а) б)

Рис. 74. Деформирование закрепленной по краям полосы под действием:
а) статической и б) динамической нагрузок

Так, например, при штамповке трубчатой детали возник брак деталей. По неизвестным причинам после взаимодействия с матрицей раздаваемая (рис. 75) заготовка в локальной зоне получила значительные пластические деформации обратного знака (рис. 76).

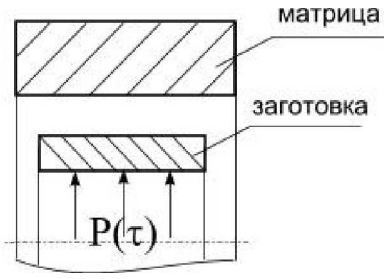


Рис. 75. Схема штамповки трубчатой заготовки «на раздачу»

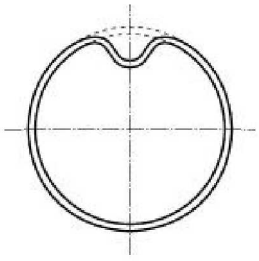


Рис. 76. Вид брака отштампованной детали

Анализ процесса показал, что причиной брака явились волновые эффекты – взаимное действие продольных и изгибных волн.

В результате нагружения исходной заготовки, неточно позиционированной относительно матрицы, ее соударение с матрицей произошло сначала в точке «а» минимального зазора (рис. 77). От точки соударения влево и вправо по заготовке начали распространяться изгибные волны.

В точке «б» максимального зазора волны встретились. Причем эти волны одного знака, то есть напряжения удвоились. Продольные же волны по толщине заготовки, приведя к ее отскоку, вывели заготовку из равновесия, и под действием удвоенного напряжением изгибных волн она приобрела обратную пластическую деформацию. После восстановления исходного центрирования заготовки относительно матрицы было достигнуто высокое качество готовой детали.

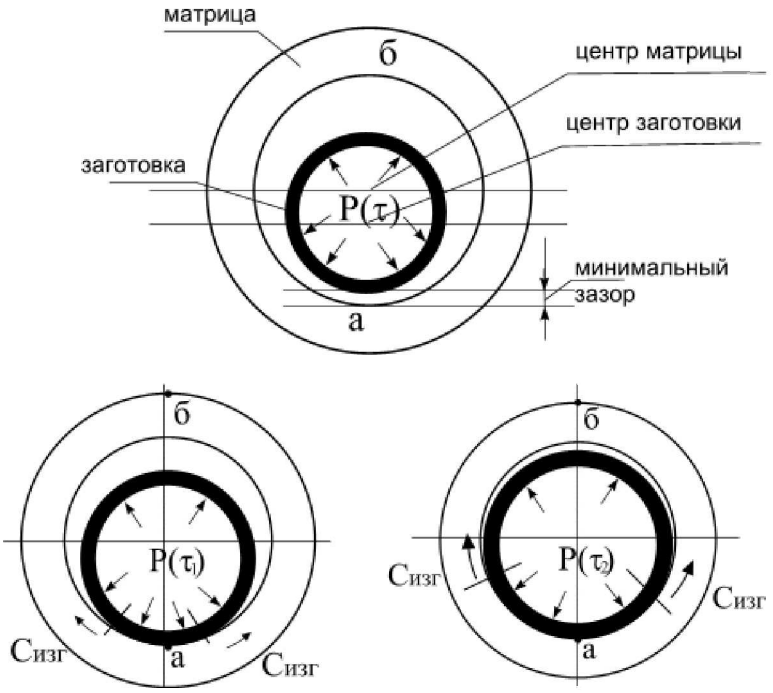


Рис. 77. Схема деформирования заготовки
при несоосном ее расположении относительно матрицы

5. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

Высокие скорости деформирования, волновые процессы в заготовке приводят к изменению механических свойств деформируемых материалов. Для высокоскоростных испытаний материалов применяют методы динамического (ударного) растяжения или сжатия цилиндрических или плоских образцов при относительно невысоких значениях скоростей деформации $\dot{\varepsilon} = 10^1 - 10^3$ 1/с. В этих методах можно принять напряженное состояние однородным. При более высоких скоростях деформаций появляется необходимость учета волновых эффектов.

Поэтому при больших скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 10^4 - 10^5$ 1/с заслуживает внимания метод испытания полосы на поперечный удар. Этот вид испытаний основан на изучении закономерностей распространения изгибных волн.

Применяется также метод раздачи кольцевых образцов. Используя уравнение движения образца, замеряя в эксперименте изменение радиуса и величину нагрузки, находят соответствующее значение напряжений.

В результате динамических испытаний получают либо отдельные константы механических свойств, либо динамические кривые упрочнения.

Обработка результатов испытаний позволила для аналитического описания динамических кривых упрочнения получить ряд выражений, например

$$\sigma_i = \sigma_i^o (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_o)^m ,$$

где σ_i и σ_i^o – интенсивности напряжений соответственно для скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}$ и $\dot{\varepsilon}_o$, а m – константа, определяемая экспериментально.

Для инженерных расчетов при определении динамических констант механических свойств металлов С.И. Губкин [27] рекомендовал использовать коэффициент динамичности:

$$K(\sigma_в) = \frac{\sigma_в^{дин}}{\sigma_в^{ст}};\ K(\sigma_{0,2}) = \frac{\sigma_{0,2}^{дин}}{\sigma_{0,2}^{ст}};\ K(\delta) = \frac{\delta^{дин}}{\delta^{ст}}.$$

Коэффициенты динамичности позволяют оценить изменение значений соответствующих констант механических свойств ($\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, δ) при изменении скорости деформации $\dot{\varepsilon}$.

Если значения коэффициентов динамичности больше единицы (К > 1), то это означает, что динамические константы больше статических.

При $K = 1$ механические свойства металлов не меняются, а при $K < 1$, наоборот, константы динамических свойств будут ниже статических значений.

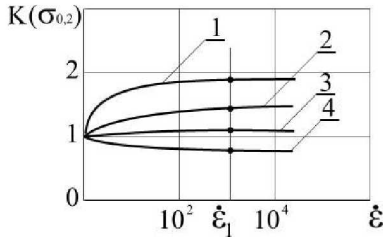


Рис. 78. Зависимость коэффициента динамичности К ($\sigma_{0,2}$) от $\dot{\varepsilon}$ для различных марок материала: 1 – Сталь 3; 2 – Сталь 45; 3 – Х18Н10Т; 4 – ШХ15

На рис. 78. в качестве примера приведены экспериментальные кривые изменения K ($\sigma_{0,2}$) от $\dot{\varepsilon}$ для некоторых марок материала.

Из графиков видно, что материалы не одинаково «реагируют» на повышение скорости деформации; одни (сталь 3, сталь 45) увеличивают предел текучести в 1, 3 – 1,7 раза, другие (Х18Н10Т) – его практически не меняют, а для высокопрочной стали ШХ-15 он даже снижается.

Интенсивное изменение коэффициентов динамичности K ($\sigma_{0,2}$) происходит в диапазоне скоростей до 10^2 1/с, а далее это изменение незначительно, что позволяет принимать в технологических расчетах значения K ($\sigma_{0,2}$) при $\varepsilon > 10^2$ 1/с постоянными.

Если приведенный на рис. 78 график перестроить в координатах K ($\sigma_{0,2}$) = $f(\sigma_{0,2}^{\text{стат}})$ при каком-либо фиксированном значении $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1$, то можно выявить некоторую тенденцию в поведении материалов при динамическом нагружении.

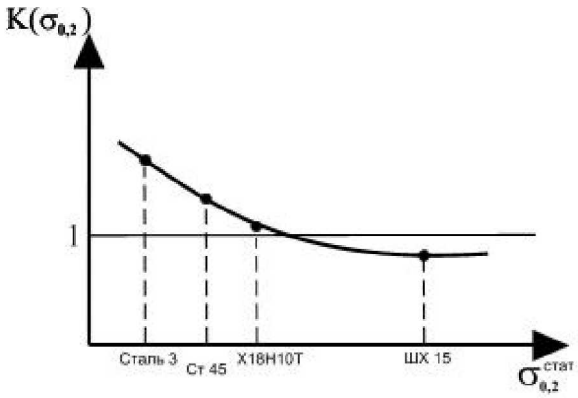


Рис. 79. Зависимость К ($\sigma_{0,2}$) = f($\sigma_{0,2}^{\text{стат}}$) при фиксированном значении $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1$

Материалы, имеющие меньшее значение предела текучести при статическом нагружении, в большей степени «реагируют» на изменение скорости деформации, то есть для них коэффициент динамичности будет иметь большие значения.

Значения коэффициентов динамичности для ряда материалов приведены в таблице 10.

Таблица 10. Коэффициенты динамичности ряда материалов

Коэффициент динамичности	Марки материалов					
	МО	АД1	Д16М	АМг6М	08кп	Х18Н10Т
К(σв)	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,1
К(σ0,2)	1,4	1,4	1,3	1,4	1,3	1,3
К(δ)	1,4	1,7	1,5	1,7	1,3	1,1

Из таблицы видно, что практически для всех деформируемых материалов динамические свойства выше статических, причем наблюдается опережающий рост значений предела текучести по сравнению с пределом прочности и значительное увеличение пластичности металла.

Чем объяснить такое поведение материалов при динамическом деформировании? Как известно, внутри кристалла деформация осуществляется за счет скольжения или двойникования при напряжениях, превышающих критические значения в соответствующих плоскостях. Величина и последовательность достижения этих напряжений зависит от ориентации плоскостей скольжения по отношению к нагрузке. При статическом нагружении пластическая деформация начинается в зернах по плоскостям с наиболее благоприятной ориентацией плоскостей скольжения, в которых касательные напряжения максимальны.

При динамическом нагружении создаваемые в металле напряжения по всему деформируемому объему значительно превышают значения, необходимые для начала пластической деформации. Это создает возможность скольжения или двойникования одновременно по нескольким плоскостям: и наиболее удачно ориентированным к направлению приложения нагрузки, и отличающимся от них. Но для деформации по неблагоприятно расположенным плоскостям требуются большие значения напряжений. Вот почему динамический предел текучести значительно выше статического. К пределу прочности при статическом и динамическом деформировании практически все плоскости скольжения или двойникования вовлечены в деформацию, поэтому и отличие в константах $\sigma_в^{стат}$ и $\sigma_в^{дин}$ сокращается.

Изменение пластичности металлов можно объяснить следующими причинами:

1. Адиабатический характер динамического деформирования сдвигает этот процесс от холодного к теплому.

При статическом деформировании тепловой эффект не принимается в расчет, так как выделившееся тепло успевает перейти в деформирующий инструмент, окружающую среду. Материал деформируемой заготовки не нагревается. Процесс статического деформирования изотермический.

При динамическом деформировании, когда процесс длится $10^{-3} \div 10^{-5}$ секунды, все выделившееся тепло остается в деформируемой заготовке. Ее температура повышается, и завершается процесс деформирования уже при более высокой температуре $T_0 + \Delta T_0$.

Из диаграммы пластичности, приведенной на рис. 80, видно, что повышение температуры обуславливает прирост ($\Delta\delta_1$) пластичности металла.

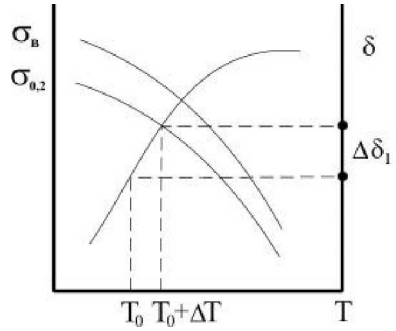


Рис. 80. Диаграмма пластичности металлов

2. При динамическом деформировании происходит изменение схемы напряженного состояния, например, при раздаче кольца: от одноосного растяжения к плоской схеме с дополнительным сжимающим напряжением (рис. 81), возникшим в результате действия инерционных сил $F=ma$, имеющих противоположное направление действию активных сил.

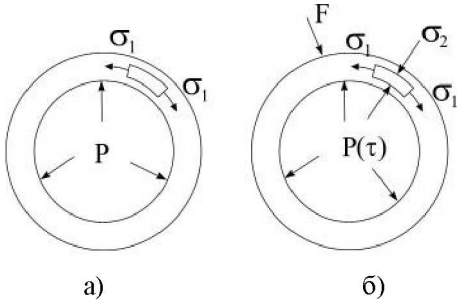


Рис. 81. Изменение схемы напряженного состояния при раздаче кольца под действием статической (а) и динамической (б) нагрузок

Большие значения скоростей деформирования V = 30 ÷ 200 м/с и малое время деформирования $\tau = 10^{-3} \div 10^{-5}$ с обуславливают $[dv/d\tau = a]$ значительные инерционные силы. Повышение доли сжимающих напряжений приводит к увеличению пластических свойств ($\Delta\delta_2$) (рис. 82).

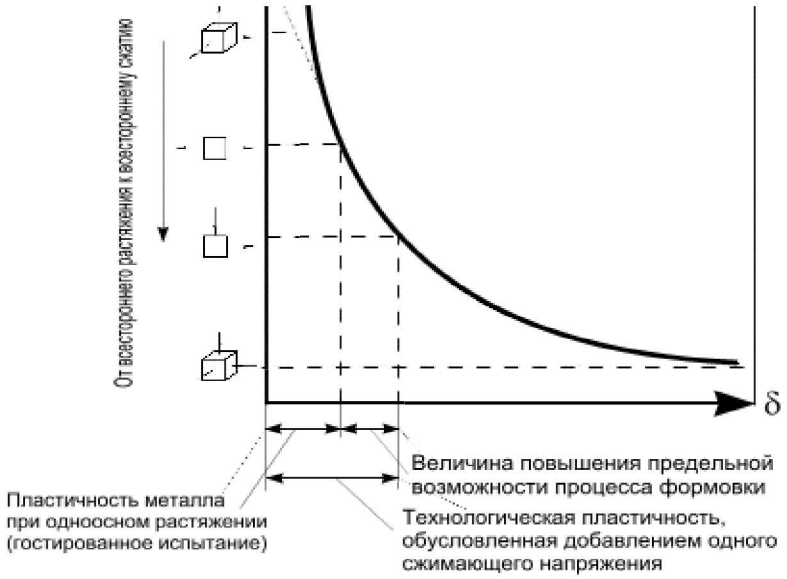


Рис. 82. Технологическая пластичность металла
в зависимости от вида напряженного состояния
(от всестороннего растяжения к всестороннему сжатию)

3. Динамическое нагружение обуславливает некоторую независимость процесса деформирования по периметру, например, раздаваемого трубчатого образца от каких-либо внутренних и внешних несовершенств.

Так, при статическом нагружении деформация утонения $\varepsilon_t = (t_k - t_0)/t_0$ сосредотачивается в наиболее «тонком» месте (следствие разнотолщинности) и кольцо в этом месте разрушается (рис. 83).

При динамическом нагружении все участки трубы (по периметру) вступают в деформацию практически одновременно и деформируются как бы независимо друг от друга.

В этом случае к моменту предельной локализации деформации в «тонком» месте все другие участки также успели продеформироваться, что и обуславливает дополнительное увеличение пластичности $\Delta\delta_3$. При

статическом нагружении кольцо, как правило, разрушается в одном месте, а при динамическом разлетается на несколько осколков.

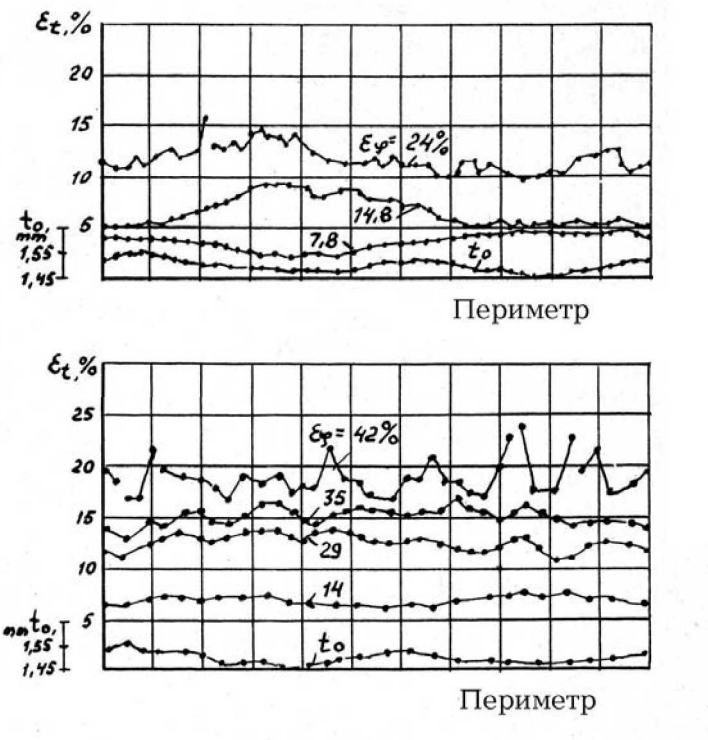


Рис. 83. Распределение деформаций по периметру заготовки при статическом (вверху) и динамическом (внизу) нагружении

Таким образом, общее увеличение пластических свойств материалов при динамическом деформировании является причиной комплексного действия рассмотренных факторов.

$\Delta\delta = \Delta\delta_1 + \Delta\delta_2 + \Delta\delta_3 ...$

Существуют и другие причины повышения предельных деформаций при реализации динамических процессов листовой штамповки – это влияние конкретных технологических схем, условий трения, нагрева от вихревых токов и другие. Эти факторы позволяют обеспечить значение технологической пластичности, иногда в два с лишним раза превышающее ее значение при статическом деформировании.

Увеличение значений констант $\sigma_{0,2}^{\text{дин}}$ и $\sigma_{в}^{\text{дин}}$ особых преимуществ для операций листовой штамповки не дает, хотя бы потому, что процесс деформирования будет требовать больших затрат энергии (усилий).

Повышение же пластичности металлов при динамическом нагружении расширяет технологические возможности динамических процессов листовой штамповки, уменьшает, например, потребное количество переходов.

Если в расчетах динамических операций листовой штамповки использовать статические значения констант механических свойств, то это может привести к большим погрешностям, например, при определении потребной энергии деформирования; ее значения будут существенно занижены, что приведет к недоштамповке детали.

Кривые динамического упрочнения с учетом изложенного выше изменения $\sigma_{0,2}^{дин}$ и $\sigma_в^{дин}$ и $\delta^{дин}$ всеми своими точками лежат выше статических (рис. 84).

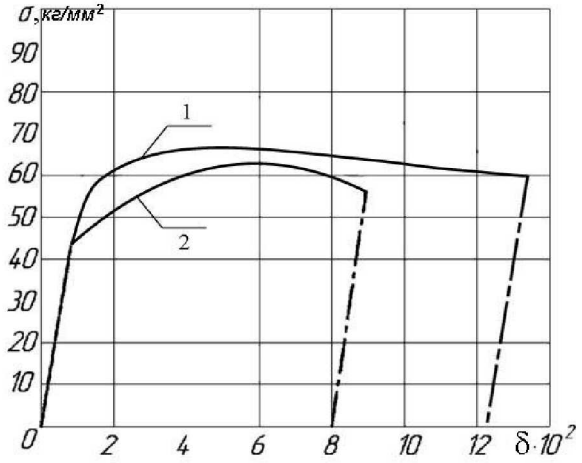


Рис. 84. Диаграмма напряжение – деформация
для высокопрочного алюминиевого сплава при растяжении:
1 – динамическое; 2 – статическое нагружения

Динамические кривые упрочнения также можно аппроксимировать степенной функцией $\sigma_I = K\, e_i^n$, но, естественно, коэффициенты степенной аппроксимации «*K*» и «*n*» будут другими, рассчитанными по значениям динамических свойств (таблица 11).

Таблица 11. Динамические свойства материалов

Марка материала	$\rho.10^3$ г.с²/см⁴	$E.10^{-3}$ кг/мм²	Механические свойства			Константы упрочнения	
			$\sigma_в^в$, кг/мм²	$\sigma_{0,2}^д$, кг/мм²	$\delta^д$,%	$K^д$	$n^д$
МО, М1	8,94	11,0	30,0-33,6	9,65-9,80	20,0-30,0	60,4-65,0	0,307-0,302

Окончание табл. 11

АД1	2,71	7,10	11,7	3,84-4,50	27,0-36,0	17,7-19,8	0,268-0,224
Д16М	2,78	7,10	21,0-23,0	10,0-14,5	16,8-22,8	33,2-35,7	0,167-0,157
Д16Т	2,78	6,90	48,4-50,9	42,0-45,6	21,6-24,2	68.76-72,86	0,104-0,097
Амг3М	2,67	7,00	27,0	16,8	27,0-36,0	40,12-44,13	0,177-0,118
Амг6М	2,64	6,80	39,0-52,0	25,2-28,6	23,0-32,4	62,4-89,2	0,234-0,176
ОТ4	4,55	11,0	122	112	6,80-10,6	~ 166	~0,0865
ВТ14	4,52	11,0	133	122	5,30-6,00	181,5-189	0,098-0,094
Ст10	7,85	20,0	52,0-56,8	21,6-27,0	26,0	91,7-96,3	0,25-0,22
Ст35	7,85	20,0	75,4	31,5-41,9	18,2	125-134	0,24-0,20
Ст45	7,81	20,0	68,0-95,2	81,5	14,1-16,8	85,4-130	0,01-0,09
40Х	7,75	20,0	122-150	97,8-119	13,5-21,6	176-222	0,13-0,11
Х18Н10Т	7,80	18,8	66,0-105	42,0-47,4	32,0-65,0	106-194	0,26-0,17
30ХГСА	7,85	20,0	100-87,5	58,0-63,0	12,0	94,8-132	0,14-0,09

6. ВЗРЫВНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

6.1. Определение, виды и характеристики взрывчатых веществ

Взрыв – процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени. Так, например, в результате взрыва твердое взрывчатое вещество (ВВ) за миллионные доли секунды переходит в новое агрегатное состояние – разогретый газ – без изменения объема. Разогретый газ при этом будет находиться в сверхсжатом состоянии: сотни тысяч атмосфер. Резко расширяясь, сжатый газ воздействует на деформируемую заготовку.

Энергия молекулярных связей при взрыве ВВ выделяется при превращении его в газ в виде теплоты. Температура сжатого газа достигает несколько тысяч градусов.

Заряд 1 кг гексогена, объем которого 0,6 л, а теплота взрыва 5,4 мДж (1300 ккал), переходит в газообразное состояние за 10 мкс, что соответствует мощности порядка 500 млн. кВт (в десятки раз больше, чем мощность самой крупной электростанции в мире).

Взрывчатые вещества могут быть газообразными и твердыми (конденсированными). Газообразные ВВ представляют собой смесь газов: водорода, ацетилена, метана или других с кислородом. Твердые взрывчатые вещества представляют собой нитросоединения (гексоген, нитроглицерин, тетрил) или соли азотной кислоты (нитрат аммония). Как правило, эти твердые взрывчатые вещества используются не в чистом виде, а в виде смесей (динамит, аммонит и др.).

Твердые ВВ изготавливаются в виде порошка, прессованных брикетов, литых зарядов различной формы, листов, шнуров.

Основным критерием выбора ВВ является такая его характеристика энергоспособности, как удельная теплота взрыва в ккал/кг или кДж/кГ.

Так, для тротила она составит 1010 ккал/кГ (4230 кДж/кг), тетрила – 1100 ккал/кг, гексогена – 1300 ккал/кг, аммонита – 1000 ккал/кг, нитрата аммония – 380 ккал/кг.

Для газовых смесей энергоспособность – это количество теплоты, выделившееся, например, при сгорании 1 кг смеси: водорода и кислорода 3230 ккал; ацетилена и кислорода – 2950 ккал; пропана и кислорода – 2400 ккал.

К другим характеристикам взрывчатых веществ относятся бризантность – степень воздействия ВВ на материал заготовки, находящейся вблизи от заряда; фугасность – вдали от заряда. Кроме того, ВВ должны обладать химической и физической стойкостью – способностью сохранять свои свойства в процессе транспортировки и хранения, то есть чувствительностью к внешним воздействиям.

6.2. Давления, развиваемые при взрыве

Существует два вида взрывов:

1) медленный взрыв (горение);

2) быстрый взрыв (детонационный).

Медленный взрыв характеризуется химической реакцией горения почти «одновременно» по всему объему, например, газовой смеси.

Быстрый взрыв – перемещение зоны химической реакции в виде детонационной волны. Скорость детонационной волны достигает $(5\text{-}8)\cdot 10^3$ м/с.

Взрыв ВВ может осуществляться как при непосредственном его воздействии на обрабатываемую заготовку, деталь (технологии упрочнения, сварки взрывом, удаление заусенцев и др), так и на некотором расстоянии от них, в том числе через передающие воздушную, водную среды или твердое тело.

Механизм образования импульсных давлений и передачи их заготовке при штамповке взрывом рассмотрим на примере наиболее часто используемой в штамповочном производстве схемы взрыва в воде.

При срабатывании детонатора внутри ВВ возникает фронт химической реакции – детонационной волны (а). Во фронте волны и за ней твердое ВВ превращается в сжатый и нагретый газ. При выходе на поверхность заряда детонационная волна переходит в мощную ударную волну в жидкости (б). Возникшая ударная волна движется по жидкости к заготовке, а продукты взрыва (сжатый газ), расширяясь, образуют парогазовую полость (в).

Энергию, выделенную зарядом, взорванным в воде, можно разделить приблизительно на две равные части. Около 50% уносит с собой ударная волна, 50 % остается в газовом пузыре.

Газовый пузырь, расширяясь, создает направленный в сторону заготовки гидропоток (г).

Дойдя до заготовки, ударная волна отдает ей часть своей энергии на деформацию металла, а часть энергии ударной волны отразится от заготовки (д).

Затем под действием сил сопротивления пластической деформации заготовка замедляет свое движение. Гидропоток догоняет ее, сообщая новый силовой импульс (е).

Далее происходит довольно сложный процесс схлопывания парогазовой полости, взаимодействия отраженных волн, гидропотоков и т.д., но практическое значение имеет лишь первая стадия распространения ударной волны и действия гидропотока (80-90% энергии).

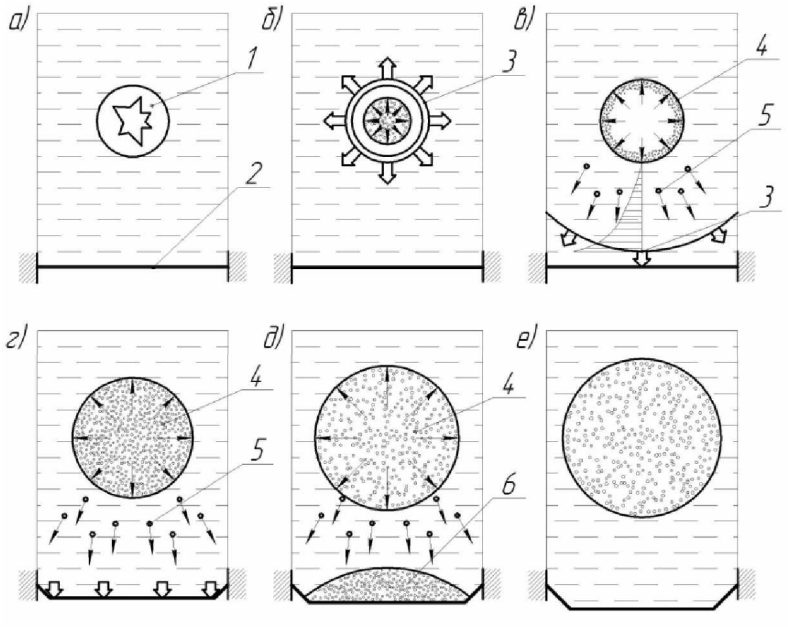


Рис. 85. Схема образования импульсных давлений и передача их заготовке при взрыве: 1 – сферический заряд ВВ; 2 – деформируемая заготовка; 3 – ударная волна; 4 – парогазовый пузырь; 5 – поток жидкости; 6 – зона кавитации

Давление, возникающее при взрыве (горении) газовой смеси определяется по формуле

$$P = P_0 \frac{T}{T_0},$$

где P_0 и T_0 – начальное (исходное) давление и температура газовой смеси; T – температура продуктов взрыва.

Если принять P_0 = 1 атм., T_0 = 293^{0}К, а T = (3000 ÷ 4000)^{0}К, то величина давления взрыва составит около 10 атм. Это настолько низкое давление, что использовать его для штамповки почти не представляется возможным. Для повышения давления используется предварительное сжатие газовой смеси со степенью компрессии n = 5, тогда возникающие давления могут быть увеличены $(P = nP_0 \cdot \frac{T}{T_0})$ в 5 раз и доведены до 50 атм. Но и этого давления достаточно лишь для штамповки тонкостенных заготовок.

При взрыве твердых взрывчатых веществ возникающие давления за фронтом детонационной волны весьма велики и определяются по формуле:

$$P = \rho \frac{D^2}{4},$$

где ρ – плотность ВВ, а D – скорость детонационной волны.

Максимальное же давление, воспринимаемое заготовкой, зависит от веса взрывчатого вещества (ω) и его расстояния H до неё.

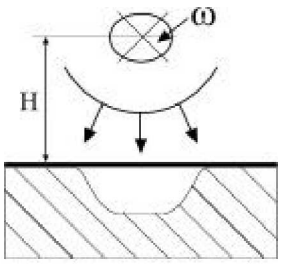


Рис. 86. Расчетная схема давления взрыва на заготовку

Для тротила эта зависимость выглядит следующим образом:

$$P_m = 533\left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}\right)^{1,13}.$$

Изменение давления во времени описывается экспоненциальной зависимостью

$$P(\tau) = P_m \exp(-\tau / \theta),$$

где θ – время, в течение которого давление падает в ***e*** раз.

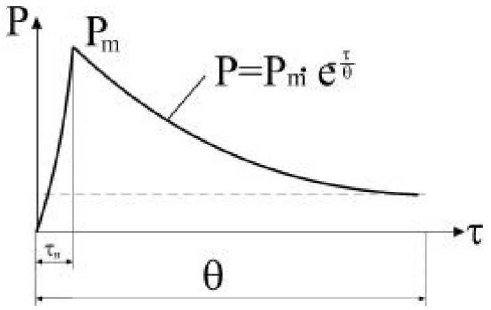


Рис. 87. Изменение давления взрыва на заготовку во времени

Используемые на практике давления составляют $(1 \div 5) \cdot 10^5$ н/м^2.

6.3. Технологические схемы взрывной обработки

При взрывной обработке можно выделить две группы разработанных технологических схем, нашедших применение в промышленности или используемых в исследовательских целях. Это схемы с непосредственным воздействием ВВ на обрабатываемые заготовки или детали и воздействием через передающие твердые, жидкие промежуточные среды.

Для разработанных технологических схем создано оборудование, технологическое оснащение и специальные устройства: бассейны, броне- и вакуумные камеры, пресс-пушки, молотки и другие.

В последующих примерах приведены некоторые технологические схемы и используемое для их реализации оборудование или оснащение.

Бассейновая штамповка (рис. 88). В этой технологической схеме используется воздействие ВВ на заготовку через жидкую среду – воду. При этом разлёт продуктов взрыва минимален, вода защищает от них поверхность заготовки. Бассейн представляет собой вырытый в грунте бетонный с металлической облицовкой колодец диаметром (при штамповке крупногабаритных деталей) до 3 ÷ 5 метров. Для ослабления воздействия ударной волны стенки бассейна дополнительно изолируют энергопоглощающими материалами или используют воздушно-пузырьковую защиту. Для снижения сейсмического воздействия на дне бассейна располагают шабот большой массы или специальные сейсмогасящие устройства. Все подготовительные работы с оснасткой выполняются на поверхности, на специальной технологической площадке рядом с бассейном.

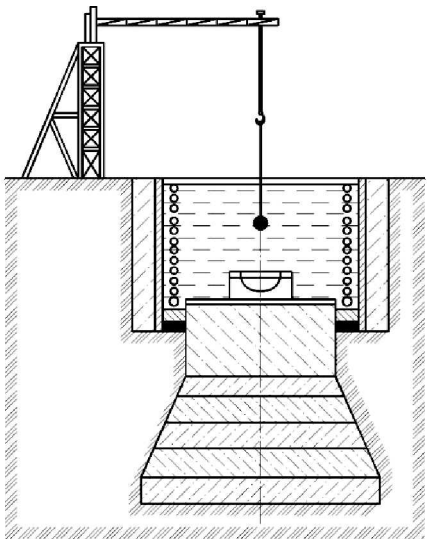


Рис. 88. Бассейновая технологическая схема взрывной штамповки

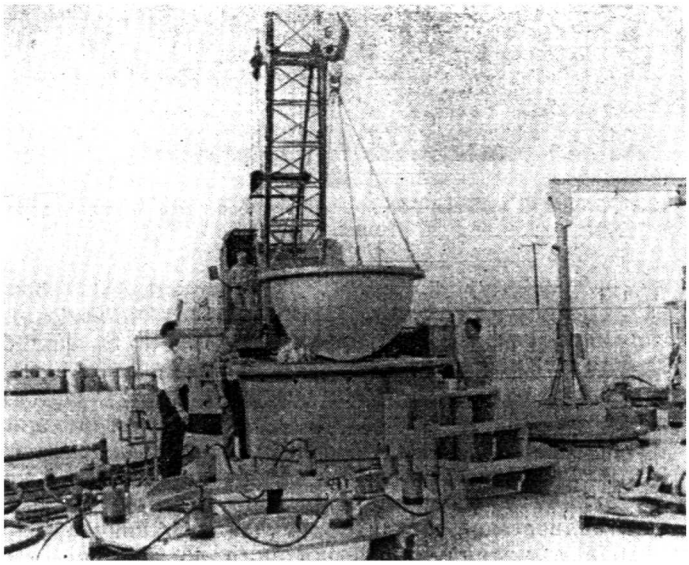


Рис. 89. Технологическая площадка.
Извлечение отштампованной полусферы из матрицы

Матрицу с закрепленной заготовкой и прижимным кольцом опускают в бассейн с водой. На определенном расстоянии от заготовки подвешивают заряд ВВ.

При взрыве ударная волна деформирует заготовку по матрице.

Глубина бассейна определяется высотой штампа, расстоянием между зарядом и заготовкой и высотой столба жидкости над зарядом, которая должна в 2 раза превышать расстояние от заряда до заготовки. Экспериментально установлено, что оптимальное расстояние от заряда до заготовки должно быть равным половине максимального размера обрабатываемой детали в плане.

От высоты столба жидкости над зарядом зависит и выброс воды из бассейна (высота «султана»). Чем выше столб жидкости над зарядом, тем меньше выброс воды.

К штамповой оснастке, кроме общих требований по прочности и технологичности, предъявляются и специфические требования, связанные с высокими скоростями деформирования заготовки. При взрывной штамповке, например, воздух между заготовкой и матрицей подвергается динамическому сжатию, препятствуя получению качественной детали. Поэтому пространство под заготовкой в полости матрицы вакуумируется. Для чего в матрице предусматриваются специальные каналы.

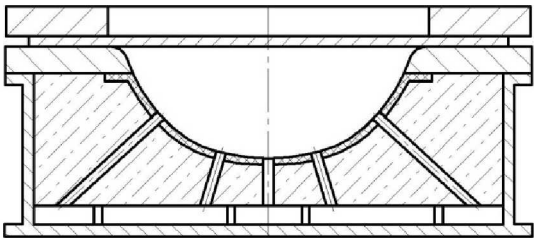


Рис. 90. Бетонная матрица для штамповки взрывом
с каналами для вакуумирования пространства под заготовкой

Повышенные сейсмические и звуковые волны вынуждают использовать бассейновой схемы штамповки вдали от промзоны на специальных полигонах.

Достоинством бассейновой схемы является:

- возможность обработки крупногабаритных деталей (до 5 метров) с большой толщиной стенки (до 25 мм) из высокопрочных материалов;
- возможность использования большого веса ВВ (кг), то есть получения высоких давлений;
- не требуется уникального прессового оборудования;
- высокое качество готовых деталей;
- универсальность технологического оснащения.

Недостатки:

- сезонность работы; сложность работы с водой в зимних условиях;
- дополнительные транспортные расходы из-за удаленности полигонов от промзоны;
- повышенные требования по обеспечению мер техники безопасности при работе с ВВ;
- значительное подготовительно-заключительное время, большой объем ручных вспомогательных работ;
- дополнительные затраты на охрану полигона и хранение ВВ.

Штамповка в бронекамерах. Высокая стоимость изготовления бассейнов, повышенная его сейсмичность и удаленность от промышленного предприятия привели к созданию безбассейновых способов штамповки взрывом – штамповке в передвижных бронекамерах.

Подвижная бронекамера имеет металлический корпус, который перемещается на колесах по направляющим (рельсовый путь).

Сварная рама обшита внутри и снаружи стальным листом толщиной 5...8 мм, пространство между обшивкой заполнено звукоизоляционным материалом. Бронекамера изолирует матрицу от внешней среды во время взрыва, перемещаясь по направляющим, может обслуживать несколько рабочих мест (рис. 92).

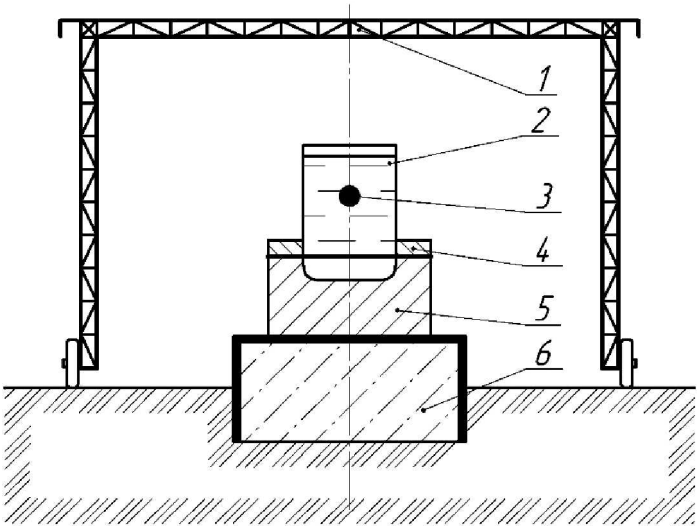


Рис. 91. Технологическая схема взрывной штамповки в бронекамере:
1 – рама, обшитая стальным листом; 2 – разовый бассейн;
3 – заряд ВВ; 4 – заготовка; 5 – штамповая оснастка; 6 – шабот

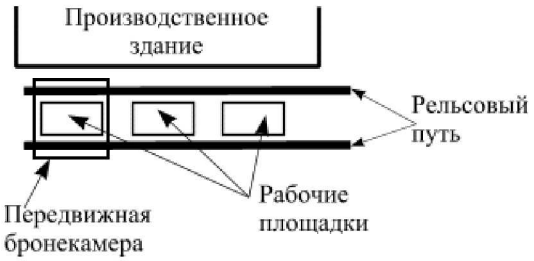


Рис. 92. Схема производственного участка с бронекамерой

Рабочее место представляет собой шабот, на котором размещается штамповая оснастка.

В бронекамерах применяются так называемые «разовые бассейны», например, полиэтиленовые мешки с водой.

Производственный участок с бронекамерой располагается уже на заводской территории рядом с производственным зданием. Отсюда все преимущества этой технологической схемы. Однако при этом надо учесть, что в бронекамерах используют ВВ значительно меньшего веса, чем в бассейнах, и, следовательно, уменьшаются габаритные размеры штампуемых деталей. Остается и проблема звукового эффекта.

Практически бесшумными являются вакуумные (взрывные) камеры, которые нашли применение как установки цехового типа, то есть применяются в закрытых производственных помещениях (рис. 93).

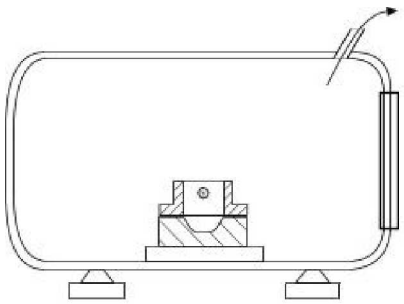


Рис. 93.Технологическая схема взрывной штамповки
в вакуумной камере

Отсутствие передающей среды (воздуха) устраняет причины звуковых эффектов при взрыве. Конструктивно такие камеры выполнены в виде стальной цилиндрической оболочки (цистерны). Объем камеры должен составлять не менее пяти объемов газов, выделяющихся при подрыве заряда (1 гр ВВ выделяет около 1 л газа). Камера вакуумируется до давления не более $0{,}1.10^5$ Па. Технологическое оснащение такое же, как и используемое в бронекамерах.

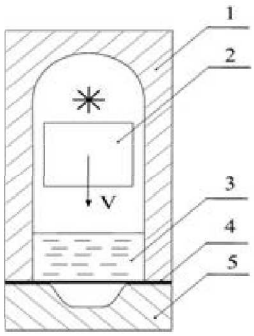


Рис. 94. Схема пресс-пушки, разработанной специалистами
Харьковского авиационного института: 1 – ствол; 2 – боек;
3 – жидкость;4 – заготовка; 5 – матрица

Воздействие энергией взрыва на деформируемые заготовки может осуществляться не только через жидкостную среду (воду), но и через твердое тело (привод) или даже через два промежуточных тела: твердое и жидкостное. Представителями такой технологической схемы являются разработанные в ХАИ молотки, прессы, пресс-пушки.

Основным элементом пресс-пушки (рис. 94) является цилиндрический ствол 1, в верхней части которого осуществляется подрыв ВВ (твердого или газообразного). Под действием энергии взрыва происходит разгон бойка 2, завершающийся его ударом по жидкости 3 (воде). Возникшее импульсное давление в жидкости передается заготовке 4.

Технологическая схема непосредственного воздействия энергии взрыва на заготовки или детали используется в прессах с газообразным ВВ, а также при нанесении твердого ВВ на поверхность заготовки (сварка взрывом) или готовой детали (упрочнение взрывом).

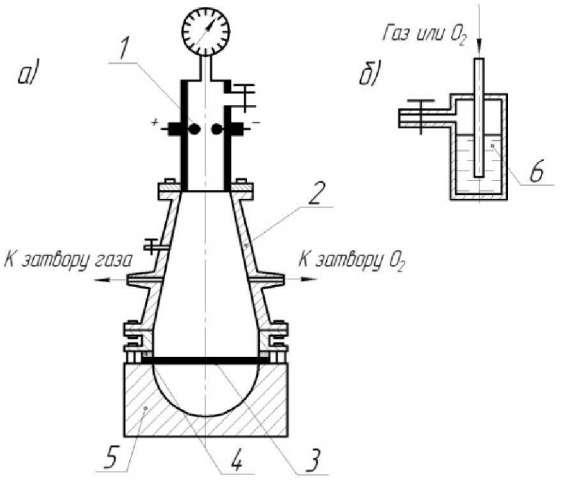


Рис. 95. Установка для штамповки взрывом газообразных ВВ:
1 – разрядник; 2 – взрывная камера; 3 – заготовка; 4 – прижим;
5 – матрица; 6 – смесь

На рис. 95 приведена схема установки для штамповки взрывчатой газовой смесью. Работа установки состоит в следующем. Между прижимом 4 и сменной матрицей 5 зажимают заготовку 3. Во взрывную камеру 2 вводят через водяной затвор под давлением газовую смесь. В верхней части камеры расположен разрядник 1, инициирующий взрыв газовой смеси в результате воздействия на нее электроискры.

Для получения биметаллических материалов также используется технологическая схема непосредственного воздействия энергии ВВ на заготовку (рис. 96).

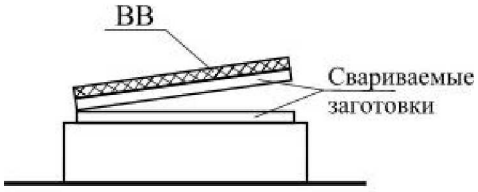


Рис. 96. Схема сварки листов взрывом

Твердое ВВ наносится на поверхность листовой заготовки, расположенной под небольшим углом к листу из другого материала. При подрыве ВВ верхний лист разгоняется до высоких скоростей соударения $V >$ 200 м/с. При импульсном взаимодействии двух тел образуется сварное соединение. Аналогичная схема используется при поверхностном упрочнении деталей ударными волнами.

6.4. Примеры использования энергии взрыва в промышленности

6.4.1. Листоштамповочное производство

Штамповка взрывом получила наибольшее распространение среди всех других применений энергий взрыва. С помощью таких операций штамповки взрывом, как вытяжка, формовка, отбортовка, развальцовка, калибровка и других получают уникальные детали изделий различных отраслей машиностроения, особенно авиакосмической промышленности. Это различного рода панели, диафрагмы, днища, сопла ракетных двигателей, рефлекторы радиотелескопов, сосуды высокого давления, корпусные оболочки, патрубки и другие.

Габаритные размеры (диаметры) штампуемых взрывом деталей достигают пяти метров. В литературе описан пример уникальной взрывной штамповки детали диаметром около 15 метров. Толщина обрабатываемых заготовок 0,5…25 мм, материал – практически любые деформируемые сплавы: алюминиевые, медные, титановые и др.

При штамповке взрывом, в том числе с использованием операций калибровки, обеспечивается высокое качество (точность) готовых деталей. Так, например, отштампованный взрывом рефлектор радиолокатора в виде сферического днища из высокопрочного алюминиевого сплава с максимальным диаметром 2 м, глубиной 0,5 м, при толщине материала 5 мм имеет отклонение от заданного по всему контуру $\pm$ 0,2 мм.

На рис. 97-100 приведены фотографии некоторых деталей, полученных штамповкой взрывом.

Себестоимость приведенных на фотографиях деталей почти в 40 раз ниже, чем у аналогов, изготовленных на прессах, а срок подготовки

производства занимает в 10-15 раз меньше времени, чем при обычных прессовых вариантах.

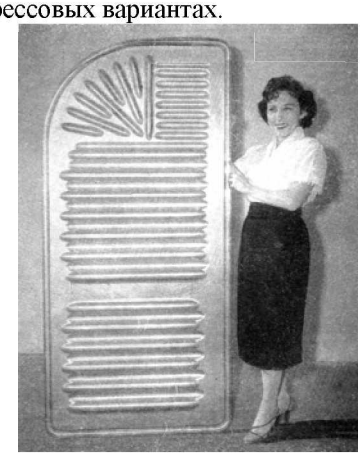


Рис. 97. Гофрированная панель реактивного самолета



Рис. 98. Днище железнодорожной цистерны

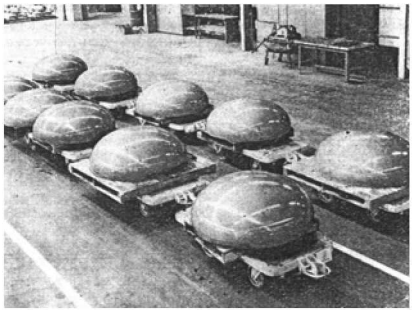


Рис. 99 Днища топливных ракетных баков

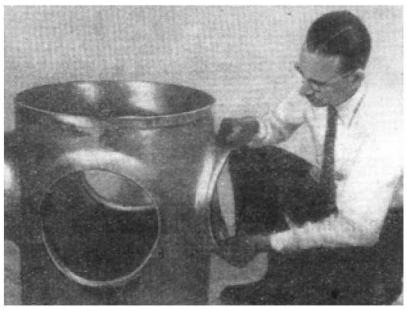


Рис. 100. Цилиндр с патрубками, отбортованными взрывом

6.4.2. Упрочнение взрывом

Взрывное упрочнение обычно осуществляется детонацией тонкого слоя пластического ВВ в контакте с поверхностью упрочняемого металла. По упрочняемому металлу распространяется ударная волна, напряжения во фронте которой и производят изменение структуры металла. В результате повышается твердость как на поверхности металла, так и внутри его, возрастают пределы текучести и прочности; деталь оказывает большое сопротивление износу, особенно при ударной нагрузке.

Взрывное упрочнение используется, например, применительно к марганцевым сталям, из которых изготавливают крестовины железнодорожных стрелок, детали мельниц, ковши экскаваторов, дробильные молоты и другие элементы, подвергающиеся в процессе эксплуатации ударам, нарастающему износу.

В таблице 12 приведены результаты взрывного упрочнения марганцевой стали.

Таблица 12. Свойства марганцевой стали после взрывного упрочнения

Характеристика металла	До обработки	После упрочнения взрывом
Твердость НВ	200	370
$\sigma_{0,2}$, кг/мм^2	41	89
$\sigma_в$, кг/мм^2	94	128

Упрочнение распространяется на некоторую глубину, что можно проиллюстрировать графиком (рис. 101).

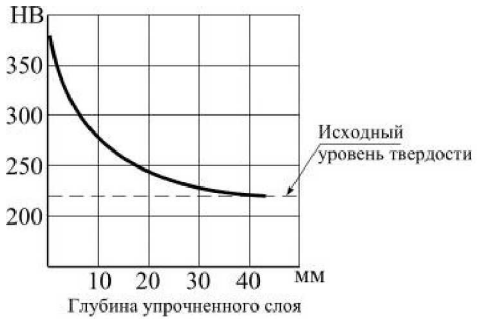


Рис. 101. Распределение твердости по глубине упрочненной взрывом пластины из марганцевой стали

В Новосибирске налажено серийное производство железнодорожных стрелок с использованием взрывного упрочнения, что подтверждает его высокую эффективность.

6.4.3. Взрывная резка металлов

Для резки металлов применяют несколько типов взрывных операций:

- резка ножами под силовым действием взрыва;
- резание контактным зарядом;
- резание профилированным зарядом;
- резание волнами напряжений.

Резание ножами (рис. 102) осуществляется встречным ударом ножей, разгоняемых энергией взрыва. При этом возникающие трещины распространяются навстречу друг другу до полного разделения металла.

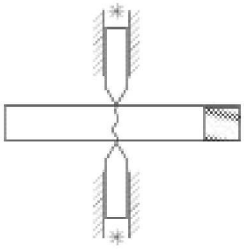


Рис. 102. Схема взрывной резки проката ножами

Такая технология используется для резки проката, например, квадратного сечения со сторонами 200×200 мм. И хотя качество разделения оставляет желать лучшего, однако высокая производительность расшивает металлургам «узкое» место при производстве и отгрузке проката из-за существовавшего ранее несоответствия производительности прокатки и резки.

При резке контактным зарядом (рис. 103) режущее действие сводится к сдвигу, который возникает под действием высокого давления на поверхности раздела между металлом и ВВ.

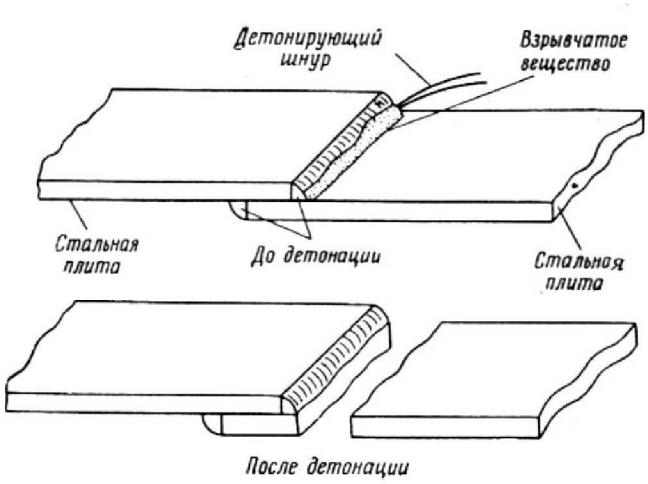


Рис. 103. Резка сварной плиты контактным зарядом

При резке профилированным зарядом (рис. 104) используется ВВ с металлической облицовкой.

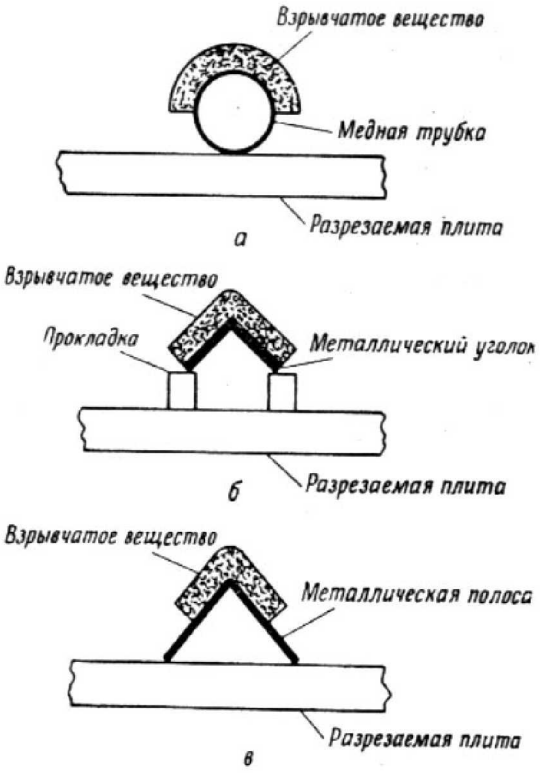


Рис. 104. Резка металла профилированным зарядом

Такой заряд располагают на небольшом расстоянии от разрезаемой заготовки или детали. Режущее действие вызывается высокоскоростным ударом металлических частичек струи от профилированного заряда.

При резке металлов волнами напряжений заряд ВВ помещают контактно с деталью. При детонации заряда большая доля энергии переходит в металл в виде импульса напряжений (волн напряжений). Процесс резания в этом случае есть следствие взаимодействия волн напряжений в определенных местах детали, которые можно определить заранее, то есть разрушение происходит путем отрыва благодаря отражению и взаимодействию волн.

Перечисленные технологии резания часто используются для утилизации отслуживших свой срок крупногабаритных конструкций, разделяя их на части для сдачи в металлолом.

6.4.4. Прессование порошков

Энергия взрыва используется в порошковой металлургии. При производстве изделий из порошка применяется технология его взрывного прессования. Порошок насыпают в форму и подвергают контактному действию ударной волны. Иногда осуществляют ряд последовательных взрывов. Такое воздействие обеспечивает весьма плотную упаковку без образования металлургических связей между частицами.

Другая технологическая схема (рис. 105) предусматривает прессование порошков в результате одно- или двухстороннего воздействия на них твердых тел, подвергнутых взрывному нагружению (поршневые прессы).

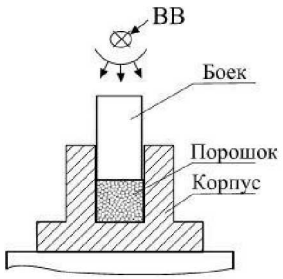


Рис. 105. Схема однопоршневого взрывного пресса

Для получения сверхвысоких давлений прессование порошков может осуществляться путем взрывного обжима трубы, в которую насыпан порошок (рис. 106).

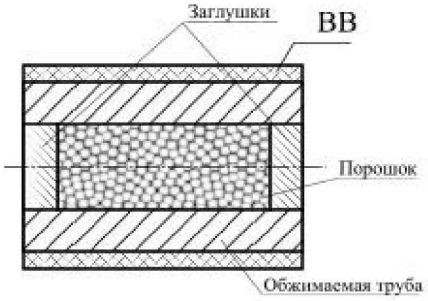


Рис. 106. Схема прессования порошков путем взрывного обжима трубы

В таких схемах возможно частичное образование металлических связей как результат высоких давлений и взаимного пластического контакта между частицами, а также за счет их локального разогрева в результате трения частиц друг о друга.

Как показали эксперименты, плотность порошков при взрывном прессовании увеличивается вдвое. Так, если исходная пористость вольфрамового порошка составляла 44,5%, то окончательная достигла 97%.

К взрывному прессованию порошков примыкает и такая технология, как компактирование стружки (рис. 107).

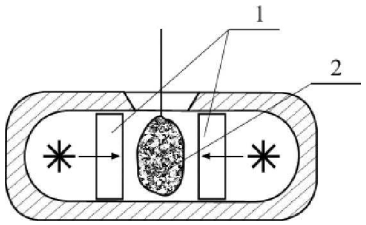


Рис. 107. Схема взрывного компактировния стружки:
1 – бойки; 2 – стружка

Под действием двухстороннего удара бойков 1 стружка 2 спрессовывается в брикеты, что обеспечивает значительный экономический эффект за счет их транспортировки на металлургические заводы (на переплавку).

6.4.5. Огневой способ зачистки заусенцев. Пример использования газообразных ВВ

На подштамповой плите размещают детали с подлежащими удалению заусенцами (рис. 108).

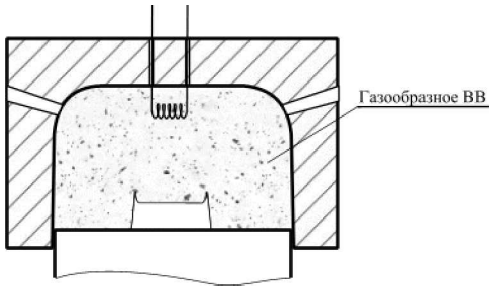


Рис. 108. Схема огневой зачистки заусенцев

В рабочей камере, заполненной газообразным ВВ, производят взрыв. Температура продуктов взрыва достигает 3000 – 4000^{0}С. Под действием этой температуры тонкий заусенец мгновенно расплавляется, а газовый поток продуктов взрыва «сдувает» расплавленный металл с детали. Длительность процесса удаления заусенца составляет 10^{-4} …10^{-3} с. За столь короткий

промежуток времени сама деталь не успевает нагреться до температуры каких-либо фазовых структурных изменений. Предлагаемая технология наиболее эффективна при удалении заусенцев в тонких сверленных каналах, например, карбюратора. Глубокие отверстия малого диаметра являются труднодоступными для механической зачистки заусенцев, особенно на пересечении каналов. Однако не представляют никакой сложности для заполнения их газовой смесью ВВ.

6.4.6. Взрывное удаление обломков инструмента из деталей ответственных изделий

Как бы тщательно и осторожно не осуществлялись, например, операции сверления, остается вероятность поломки сверл. Их удаление из ответственных изделий корпусов двигателей летательных аппаратов, автомобилей – непростая технологическая задача.

Ученые МГУ предложили оригинальный способ удаления обломков сверл с помощью взрывных устройств (рис. 109).

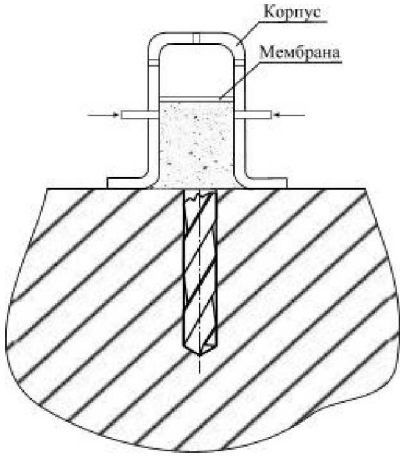


Рис. 109. Схема взрывного удаления обломков режущего инструмента

Идея метода состоит в следующем. На поверхность изделия со сломанным сверлом закрепляют переносную камеру. Внутренняя полость ее разделена тонкой перегородкой – мембраной. Пространство под мембраной заполняют газообразным ВВ, которое заполняет и каналы сломанного сверла. При взрыве происходит разрыв мембраны и газовый поток продуктов взрыва с высокой скоростью устремляется вверх, увлекая за собой обломок сверла. Предлагаемая технология прошла успешное испытание и применялась на Московском автомобильном заводе им. Лихачева (ЗИЛ).

6.4.7. Сварка взрывом

Сварка взрывом представляет собой операцию, в которой свариваемые тела соударяются с высокой скоростью с возникновением высоких давлений в зоне контакта, в результате чего между ними возникает интенсивное взаимодействие в области пластических деформаций.

Сварка взрывом наиболее эффективна при получении биметаллических соединений, например медь-сталь. Соединение разнородных металлов является довольно сложной задачей, так как свариваемые материалы порой имеют весьма ограниченную взаимную растворимость в твердом состоянии и сильно различающиеся температуры кристаллизации.

Свариваемые заготовки располагаются под небольшим углом (β = 5 … 20^0) друг к другу (рис. 110).

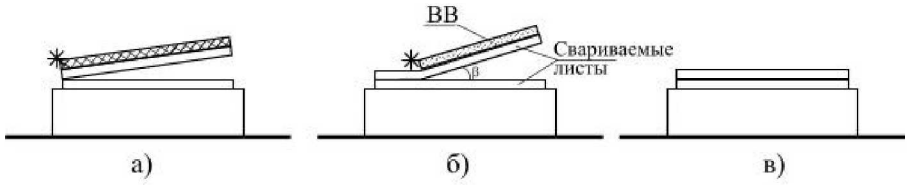


Рис. 110. Схема сварки листов взрывом:
а – исходное; б – промежуточное; в – окончательное положение

При взрыве ВВ происходит метание одной из них на поверхность другой. Усилие, возникающее при «косом» соударении, можно разложить на две составляющие: нормальную Nв и касательную Nг (рис. 111 а).

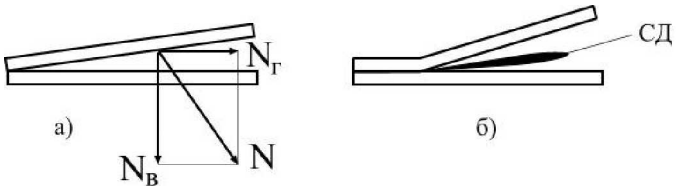


Рис. 111. Схема возникновения сдвиговых деформаций при сварке взрывом. СД – сдвиговые деформации, порождающие «струю» металла

Под действием касательной составляющей в тонком соударяющемся слое возникают сдвиговые деформации. Значение их настолько велико, что их действие приводит к образованию (течению металла) выплескиваемой струи (рис. 111 б). Происходит самоочищение поверхностей. Одновременное действие нормального давления при этом вызывает сложное пластическое взаимодействие металла в зоне контакта и образование волн завихрений (рис. 112, 113).

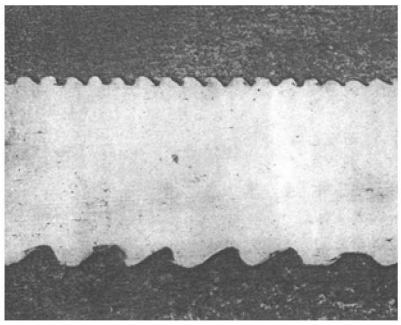


Рис. 112. Микрофотография поверхностей сварки латуни (сверху), меди (в середине) и стали (внизу)

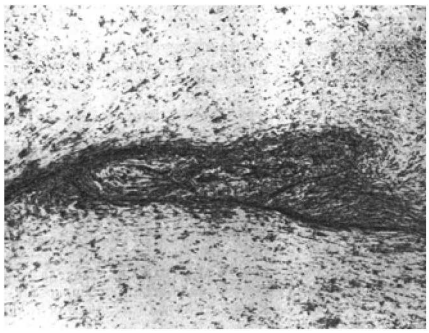


Рис. 113. Микрофотография, иллюстрирующая завихрение струи при сварке пластин

На приведенных фотографиях хорошо видна волнистость, характерная для подобных сварных швов. Высота волны от гребня до впадины находится в пределах от 0,1 до 5 мм, а длина волны – от 0,25 до 6 мм. Таким образом, волнообразная зона ограничена довольно узкой областью по обе стороны от поверхности раздела. Интенсивные пластические деформации в зоне сварного шва приводят к увеличению твердости металла (рис. 114).

Так, например, при сварке 6 мм пластин из мягкой стали с исходной твердостью HV=185 единиц на поверхности раздела твердость достигла значений HV = 275 единиц.

При правильно выбранных параметрах сварки взрывом прочность сварного шва превышает прочность свариваемого материала.

Сваркой взрывом можно сваривать однородные материалы (сталь-сталь; алюминий-алюминий; медь-медь), но наибольшее распространение она получила при производстве биметаллических соединений листов, труб, втулок и других изделий.

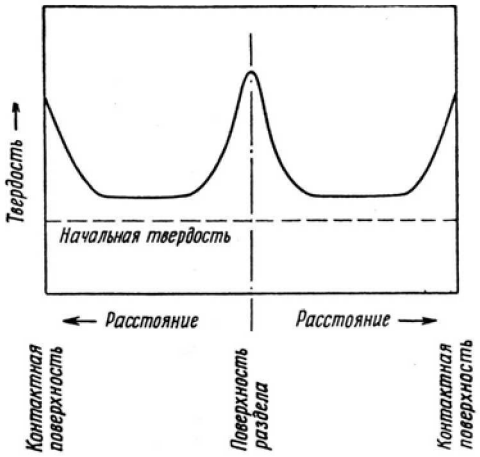


Рис. 114. Распределение твердости в пластинах, сваренных взрывом

Так, например, разработана технология взрывной сварки листов из углеродистой стали толщиной 1…16 мм и из меди толщиной 1…30 мм при площади сварки до 10 м^2.

Прочность сварного шва превышает прочность меди.

Имеется опыт сварки взрывом (сталь-медь) цилиндрических заготовок диаметром 400 мм и длиной 2 м. Полученный биметалл используется в металлургии при производстве водоохлаждаемых деталей печей (кессонов), узлов кристаллизатора (изложниц). При этом стойкость таких деталей повышается в 6-8 раз и достигается значительная экономия меди (1 тонна на 1 кристаллизатор).

В машиностроении сваркой взрывом изготавливают детали подшипников скольжения (вкладыши, сегменты, втулки), в электротехнических изделиях – это элементы двигателей, контакторов и др.

7. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

В основе электрогидроимпульсных технологий лежат физические явления высоковольтного электрического разряда в жидкости. Электрогидравлический эффект представляет собой комплекс явлений, сопровождающих разряд в жидкости, например, в воде.

Для реализации электрогидравлического эффекта используется специальное оборудование – генератор импульсных токов (ГИТ), блок- схема устройства которого приведена на рис. 115.

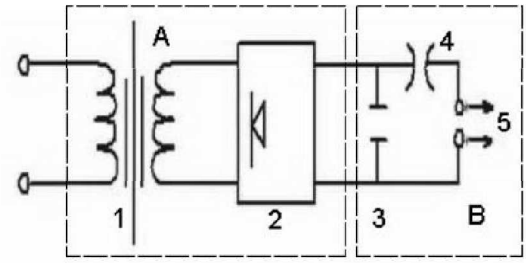


Рис. 115. Блок-схема генератора импульсных токов

ГИТ состоит из повышающего трансформатора 1 (с 380 В до 50 кВ), выпрямительного блока 2, батареи конденсаторов 3, быстродействующего коммутирующего устройства – разрядника-выключателя 4. К выходным клеммам 5 ГИТ подключаются электродные системы, между которыми и осуществляется электрический пробой в жидкости. Перечисленные узлы и блоки ГИТ можно условно сгруппировать в два укрупненных устройства: зарядное (А) и цепи разряда батареи конденсаторов (В).

Зарядное устройство позволяет накопить заданное (необходимое) для выполнения технологической операции количество электрической энергии в батарее конденсаторов

$W = CU^2/2$,

где C – емкость; U – напряжение заряда конденсаторов.

При замыкании цепи разряда, то есть включении разрядника (коммутатора), рабочее напряжение U подается на электроды, а после пробоя межэлектродного промежутка по замкнутой цепи будет осуществляться разряд батареи конденсаторов. Величина тока в разрядной цепи достигает сотен килоампер, время разряда – миллисекунды.

7.1. Физические основы электрогидравлического эффекта

Пробой межэлектродного промежутка – сложное физическое явление, протекающее в несколько стадий. Первая стадия – предпробойная – стадия образования канала разряда.

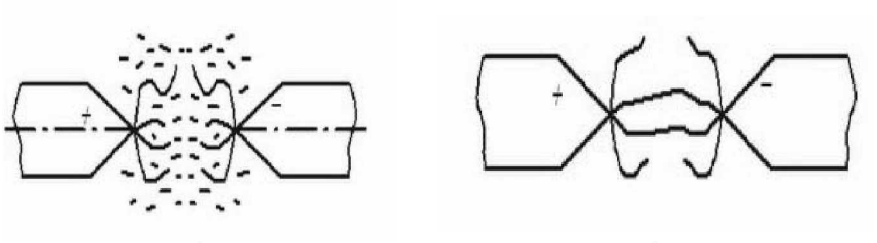
При замыкании цепи разряда высокое напряжение подается на электроды. Если представить электрод в качестве заостренного цилиндрического стержня с радиусом заострения r, то возникающее вокруг электрода электрическое поле будет иметь напряженность $E = 0{,}9\ U/r$.

В жидкости (воде) всегда присутствуют как нейтральные молекулы, так и имеющие заряд ионы. Под действием электрического поля заряженные частицы приобретают направленное движение к электродам. Этот светящийся направленный поток частиц образует около электродов «кисть» предвестников пробоя, так называемых «лидеров» или стримеров.

Стример представляет собой ионизированный плазменный канал диаметром ~ 0,1 мм, температура в котором уже достигает несколько тысяч градусов.

Скорость движения стримеров зависит от напряженности электрического поля и электропроводности жидкости и составляет десятки км/с.

В какой-то момент времени передовые стримеры, движущиеся навстречу друг другу, встретятся, замкнув таким образом цепь разряда батареи конденсаторов (рис. 116).



а) б)

Рис. 116. Последовательность формирования канала разряда:
а) начальная стадия образования стримеров; б) завершение предпробойной стадии канала разряда (встреча стримеров)

На этом предпробойная стадия завершается. Энергия, затраченная на предпробойную стадию, составляет порядка 10% энергии, запасенной в батарее конденсаторов. Ток в цепи разряда на предпробойной стадии практически отсутствует.

Встреча двух лидеров определяет начало второй стадии пробоя – формирования (расширение) канала разряда. С момента замыкания межэлектродного промежутка каналом, проложенным стримерами, начинается разряд батареи конденсаторов, то есть в цепи возникает (резко возрастает) ток разряда в сотни килоампер. Интенсивный разогрев плазмы разрядным током приводит к повышению давления в канале разряда и его расширению.

Канал разряда – плазма водяного пара, сложная смесь нейтральных атомов, ионов и электронов. Плазма разогревается до температур в несколько

тысяч градусов. Столь сильный разогрев плазмы приводит к повышению давления в канале разряда до 1,5 . 10^3 МПа. Поэтому уже через 0,1–0,3 мкс с момента смыкания стримеров канал разряда увеличивается (расширяется) с 0,1 до 1–3 мм.

Вторая стадия пробоя завершена. Канал разряда сформирован и устойчиво действует.

Стремление уменьшить энергозатраты на формирование канала разряда привело к техническим решениям, облегчающим обе стадии процесса пробоя: повышению электропроводности жидкости (вода + солевые добавки), закорачиванию межэлектродного промежутка тонкой взрывающейся проволокой. В последнем случае канал разряда как бы сформирован изначально.

В результате высокого давления и внезапного расширения канала разряда в окружающей жидкости возникает ударная волна, распространяющаяся к заготовке со скоростью ~ 1500 м/с.

Ток в цепи разряда батареи конденсаторов продолжает процесс «ударного» испарения жидкости вокруг канала разряда, образуя таким образом расширяющийся газовый пузырь. Газовый пузырь сжимает окружающую его жидкость, находящуюся в замкнутом объеме разрядной камеры.

Как только батарея конденсаторов разрядится, источник испарения жидкости исчезнет. И под действием избыточного давления ранее сжатой жидкости происходит схлопывание газового пузыря; рождается гидропоток. При достижении им заготовки возникает силовое давление, деформирующее ее по матрице.

Таким образом, при электрогидравлическом эффекте существует два вида последовательного силового воздействия на объект: ударная волна и гидропоток, причем их соотношение может достигать значений 1:10 (рис. 117).

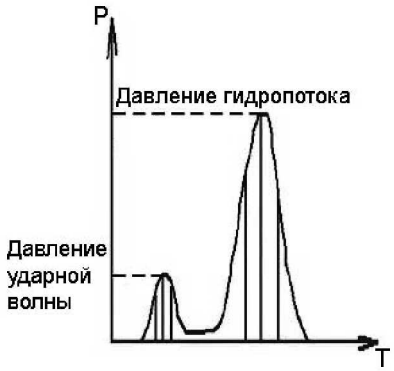


Рис. 117. Силовое давление, воспринимаемое заготовкой при электрогидравлическом нагружении

7.2. Технологические схемы электрогидроимпульсной обработки

Разработано несколько технологических схем электрогидроимпульсной обработки: схема непосредственного воздействия электрогидроэффекта на деформируемую заготовку в открытых и закрытых разрядных камерах (рис. 118) и схема воздействия на заготовку через дополнительные промежуточные тела (резиновые диафрагма, твердые тела) (рис. 119).

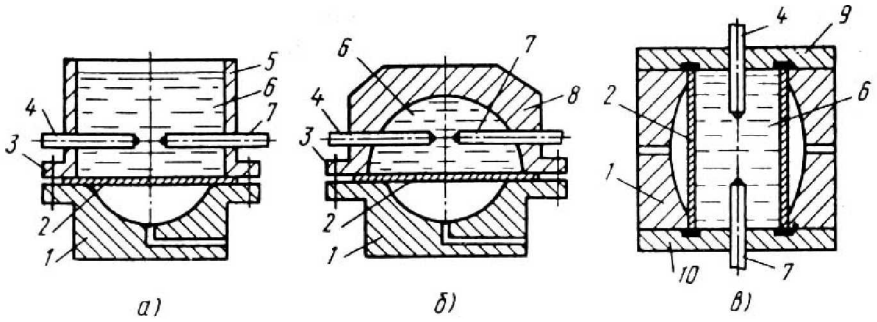


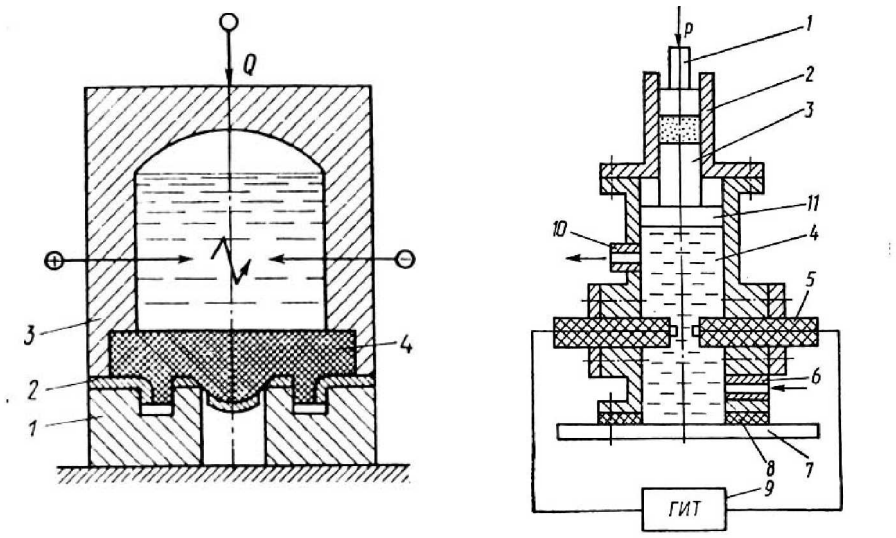
Рис. 118. Схемы электрогидравлической штамповки из плоской заготовки в открытой (а) и закрытой (б) камерах и из трубчатой заготовки в закрытой камере (в): 1 – матрицы; 2 – заготовки; 3 – прижимы; 4,7 – электроды; 5,8 – открытая и закрытая камеры; 6 – вода; 9,10 – верхняя и нижняя крышки

Закрытые камеры характеризуются сравнительно небольшим объемом жидкости, при этом наиболее полно используется эффект гидропотока для осуществления полезной работы. Коэффициент полезного действия может достигать 20-25 %.

Открытые камеры, хотя и проще и дешевле, применяются реже из-за реализации меньших давлений, например из-за возможности выхода газового пузыря на открытую поверхность.

Применение эластичных диафрагм улучшает условие работы обслуживающего персонала, отсутствие воды на рабочем месте. Такая технологическая схема напоминает схемы штамповки эластичными средами с той лишь разницей, что довольно дорогой универсальный эластичный блок заменен на практически бесплатную воду. И, кроме того, в одном рабочем цикле можно осуществлять многократное нагружение по заданной программе.

Дополнительные промежуточные твердые тела применяются в специальных камерах (например, в переносных миникамерах, используемых для развальцовки труб в трубные доски), или в различных поршневых конструкциях, используемых для прессования порошков, или для создания вибронагрузок.



а) б)

Рис. 119. Схемы электрогидравлического воздействия на объект через промежуточные тела: а) эластичную диафрагму; б) поршень

7.3. Электродные системы для электрогидроимпульсной обработки

Основным конструктивным элементом разрядных камер является система электродов, осуществляющая ввод энергии в рабочую среду. К электродным системам предъявляют два основных требования: обеспечение высокого коэффициента преобразования электрической энергии в полезную работу и экономической целесообразной стойкости.

Первое требование выполняется путем правильного выбора геометрии, особенно ее разрядной зоны (рис. 120).

Основными размерами при проектировании являются размеры d и h.

Обычно h = 30...100 мм, d = 4...10 мм. Радиус скругления r = d/2. Стойкость электродов определяется маркой материала, электрической и механической прочностью изоляции.

В качестве эрозионно-стойких материалов для электродов используют материалы медь – карбид вольфрама – никель или медь – вольфрам – никель.

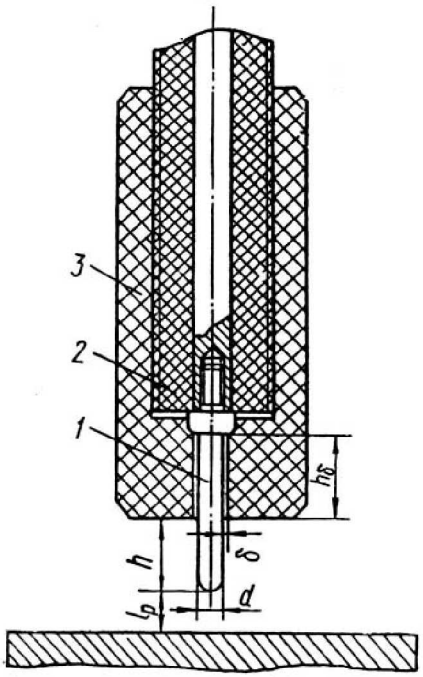


Рис. 120. Типовая конструкция электрода
1 – токопроводящий стержень; 2 – изоляция электрода;
3 – изолирующий сменный наконечник

Электродные системы можно классифицировать по следующим признакам:

- конструктивному: стержневые, коаксиальные, сложной геометрии;
- по принципу возбуждения электрического разряда: свободного разряда и инициируемые;
- по величине преобразуемой энергии: электродные системы малых (до 0,1 кДж), средних (до 25 кДж) и больших (100 кДж и более) энергий;
- по сроку эксплуатации: разового действия, разрушаемые после одного разряда, и постоянные, имеющие срок службы от нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов разрядов;
- по технологическому признаку: электродные системы для штамповки, разрушения материалов, упрочнения и т.д.

Некоторые из типовых конструкций электродных систем приведены на рис. 121.

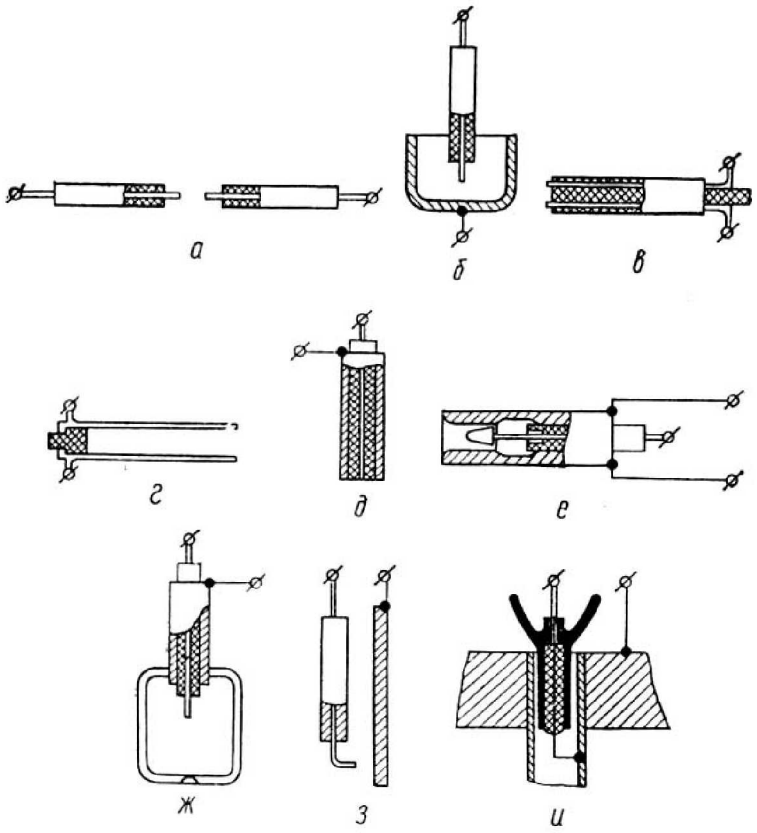


Рис. 121. Виды электродных систем: а – стержневая противостоящая линейной геометрии с разрядным промежутком стержень–плоскость;
б – стержневая противостоящая линейной геометрии с разрядным промежутком стержень-стержень; в – стержневая параллельной геометрии торцевая; г – стержневая параллельной геометрии с удлиненной разрядной зоной; д – коаксиальной геометрии торцевая; е – коаксиальной геометрии
с удлиненной разрядной зоной; ж – коаксиальная с линейным разрядным промежутком; з – стержневая с угловым расположением;
и – «взрывающийся» патрон

Многообразие электродных систем позволяет осуществлять широкий круг технологических операций, управлять силовым воздействием (рис. 122).

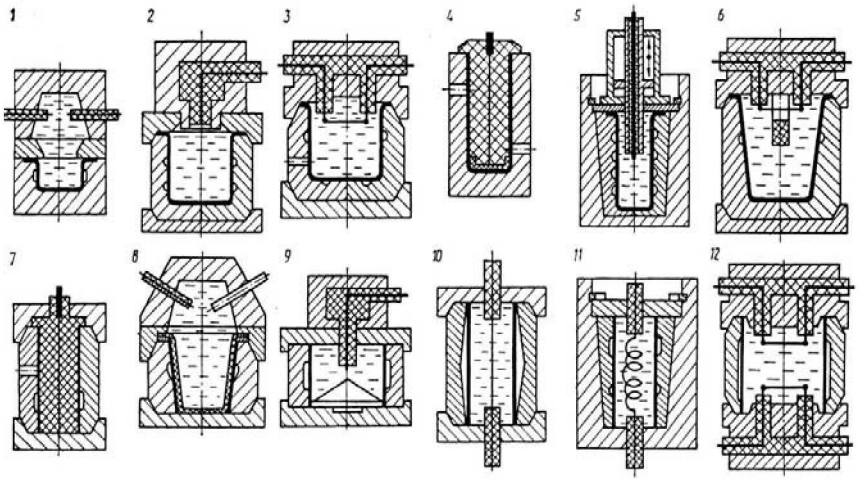


Рис. 122. Разрядные камеры и устройства для ЭГИШ деталей из пространственных заготовок: 1 – 6 – для штамповки деталей из заготовок с дном; 7 – 12 – без дна; 7 – 9 – L < 200 мм; 4 – 6, 10 – 12 L > 200 мм; 1, 7, 4, 10 – D < 50 мм; 2, 8, 5, 11 – D = 50...120 мм; 3, 9, 6, 12 – D = 80...250 мм

7.4. Конструктивно-технологические параметры эффективности электрогидравлического воздействия на обрабатываемый объект

Давление на заготовку (деталь), определяется в первую очередь энергией, запасенной в батарее конденсаторов $W = CU^2/2$. Давление на фронте ударной волны определяется по формуле

$$P = \frac{325[(1,2 + 0,5\sqrt{C})U + 4l = 32]}{h}.$$

Анализ приведенной формулы показывает, что величина давления на заготовку (деталь) прямо пропорциональна длине канала разряда 1 (больше размер газового пузыря, большая энергия гидропотока) и обратно пропорциональна расстоянию от него до заготовки h (меньшее затухание силового воздействия).

Однако увеличение l влечет за собой проблему пробоя значительного межэлектродного промежутка, а чрезмерное уменьшение h приводит к возможности пробоя на заготовку.

В связи с этим существуют оптимальные размеры l и h.

Например:

$$l_{\text{опт}} = C\frac{0,74U - 19,5}{\sqrt[3]{\pi r^2}} + 4,6U - 110,$$

где r – радиус закругления (заострения) положительного электрода.

От расстояния между электродами зависит и форма фронта ударной волны: при незначительном – она сферическая, при большом – цилиндрическая.

Для управления формой и амплитудой генерируемых волн давлений межэлектродный промежуток закорачивают взрывающейся проволокой. В этом случае значения l могут быть значительно увеличены, так как нет проблем с пробоем межэлектродного промежутка. Однако при этом необходимо учесть усложнение конструкции разрядной камеры в связи с необходимостью замены проволоки, особенно при многократном нагружении.

Уменьшение r, то есть большее заострение электрода, позволяет увеличить $l_{опт}$, но, с другой стороны, возрастает вероятность оплавления, эрозии материала электрода.

Оптимальное расстояние от канала разряда до заготовки должно быть не менее $h_{опт} = 2\ l_{опт}$. При этом необходимо помнить, что энергия ударной волны уменьшается пропорционально h^3.

Для открытых разрядных камер важным является параметр, определяемый соотношением H/h, где H – расстояние от канала разряда до свободной поверхности жидкости.

Если $H < h$, то образующийся газовый пузырь очень быстро соединится с атмосферой. На заготовку в этом случае будет действовать только первичная ударная волна. Гидропоток не образуется. Эффективность процесса снижается.

7.5. Примеры технологического применения электрогидравлического эффекта

7.5.1. Листоштамповочное производство

При электрогидроштамповке (ЭГШ), также как и при штамповке эластичной средой, штамповке взрывом, одна из половин штампа является универсальной. Для выполнения штамповочных операций применяется инструмент (матрица), а роль пуансона выполняет вода. Отличие – в источнике нагружения.

Поэтому штамповочные операции при ЭГШ аналогичны выполняемым при штамповке эластичной средой и взрывчатыми веществами: вытяжка, рельефная формовка, отбортовка, калибровка, вырубка-пробивка, используемые при изготовлении деталей из листовых и полых заготовок. Обработке подвергаются плоские заготовки площадью до 2 м^2, толщиной до 5 мм, а также полые заготовки диаметром до 500 мм, высотой 800 мм с толщиной стенки до 25 мм из алюминиевых, медных, титановых сплавов и сталей.

На рис. 123 в качестве примера показаны детали, изготовленные электрогидроимпульсной штамповкой.

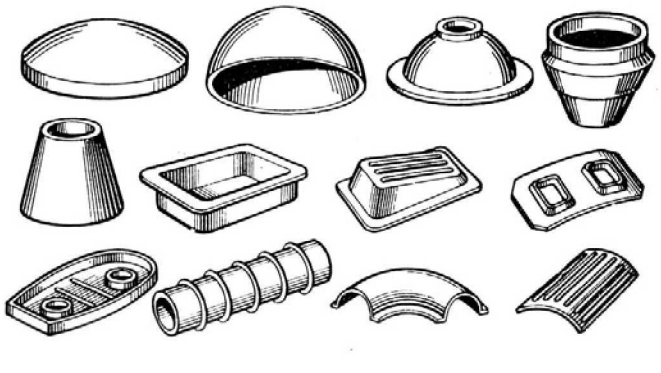


Рис. 123. Детали, изготовленные электрогидроштамповкой

Основные особенности и преимущества электрогидроимпульсного нагружения, электрогидроштамповки:

1. Универсальный пуансон (вода) значительно дешевле стоимости эластичного блока, к нему не предъявляются требования по обеспечению стойкости, остаточной деформации и др.

2. Электрогидравлическая штамповка позволяет в пределах одного рабочего цикла осуществлять многократное нагружение, иногда с добавлением некоторого объема воды в перерывах между разрядами.

3. При ЭГШ имеется возможность гибкого управления интенсивностью и формой ударной волны, гидропотоков, что обеспечивает возможность изготовления деталей весьма сложных форм.

4. Высокая скорость нагружения при ЭГШ, в том числе через эластичные диафрагмы, дает возможность улучшения качества готовых деталей.

5. Процессы ЭГШ реализуются в цеховых условиях с обеспечением необходимых мер по технике безопасности при работе на электроустановках с напряжением свыше 1000 вольт.

Представляют технический интерес конкретные примеры некоторых деталей, отштампованных (изготовленных) с помощью операций ЭГШ: корпус самолетного унитаза из нержавеющей стали, за разработку и реализацию технологии изготовления которого авторы были удостоены золотой медали ВДНХ СССР и ценного подарка – автомобиля; входная дверь самолета ТУ-154 на уникальном прессе УЭГП-150; корпус самовара; художественный барельеф с чеканкой тончайших линий, штрихов портрета и многие другие.

Преимущества ЭГШ послужили не только причиной оснащения целого ряда предприятий единицами такого оборудования, но и поводом для

создания целого участка (линии) из прессов ПЭГ, как, например, на Казанском вертолетном заводе.

7.5.2. Электрогидравлическая развальцовка труб

При изготовлении теплообменных аппаратов самой ответственной операцией является операция развальцовки (закрепления) концов труб в трубных решетках (рис. 124).

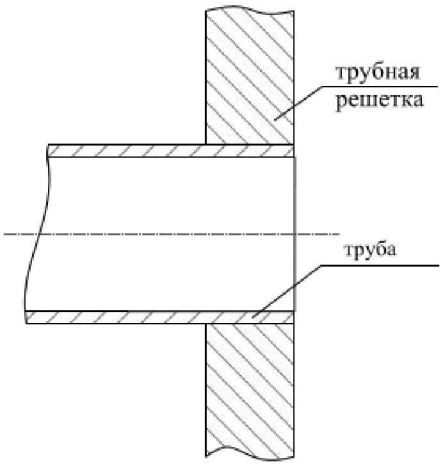


Рис. 124. Фрагмент теплообменного аппарата

Эта операция осуществляется путем образования натяга между наружной поверхностью трубы и отверстием решетки.

Для закрепления труб в трубных решетках используются операции сварки, дорнования, ручной развальцовки, взрывной раздачи и др. Все они имеют недостатки, главные из которых: большая трудоемкость, тяжелый ручной труд, недостаточное качество соединения.

Закрепление труб в решетке электрогидроимпульсным методом осуществляется с помощью специальных электровзрывных патронов (ПЭВ). При взрыве патрона импульс высокого давления вызывает такие деформации трубы и решетки, которые после упругой разгрузки обеспечивают в соединении заданные натяг, плотность и прочность.

Конструкция одного из применяемых разовых патронов приведена на рис. 125.

ПЭВ состоит из гильзы с юбкой 1, наполнителя (воды) 2, взрывающегося проводника 3 с токоподводящим стержнем 4. Юбка изолирует место подвода энергии от трубной решетки.

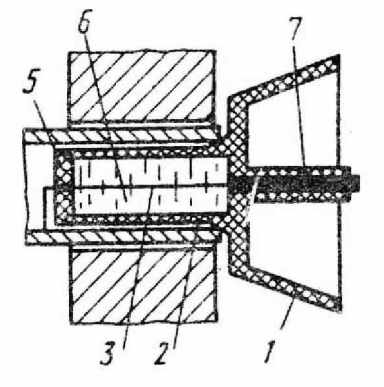


Рис. 125. Конструкция разового патрона

Для осуществления электрогидроимпульсной развальцовки используют ряд электрогидравлических установок «Молния», технические характеристики одной из них (ТО 225) приведены ниже:

Максимально запасаемая энергия, кДж	40
Рабочее напряжение, кВ	30…50
Емкость батареи конденсаторов, мкФ	32
Диаметр запрессовываемых труб, мм	5…40
Толщина стенки трубы, мм	1…3,5
Длина запрессовки, мм	20…220
Габаритные размеры трубной решетки, мм	1500 × 2100
Производительность, концов в час	300

«Минус» батареи конденсаторов электрически соединен с трубной решеткой. Схема управления процессом обеспечивает выделение энергии (при взрыве проволоки) в момент нахождения положительного электрода ГИТ у центра патрона, то есть у его центрального токоподвода (рис. 126).

Электрод ГИТ в горизонтальной и вертикальной плоскостях перемещается специальным механизмом по заданной программе.

Таким образом, подготовленный к операции развальцовки теплообменный аппарат падают на участок развальцовки. Внутренние полости труб очищают от различных загрязнений и продувают сухим сжатым воздухом. Таким образом, технология развальцовки труб в трубные доски состоит в следующем: в концы труб вставляют электровзрывные патроны

(ПЭВ). Оператор с пульта управления включает установку и в автоматическом режиме производит развальцовку концов труб. При этом обеспечивается натяг, соответствующий степени развальцовки 0,5…2,5 %.

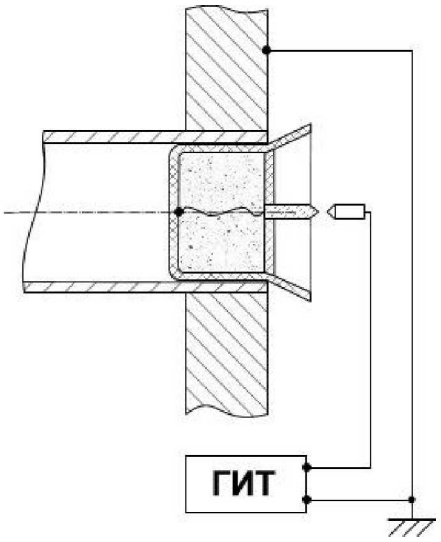


Рис. 126. Схема подключения ПЭВ к ГИТ

Применение электрогидравлической развальцовки труб в трубных решетках позволило значительно повысить производительность труда с обеспечением высокого качества соединения.

7.5.3. Упрочнение металла водно-воздушными струями

Повышение стойкости рабочих элементов штампов (матриц, пуансонов), особенно для разделительных операций, является актуальной задачей штамповочного производства. Это связано прежде всего с расходом дорогостоящей инструментальной стали, что естественно отражается на себестоимости выпускаемой продукции (повышение на 25%).

Схема электрогидроимпульсного упрочнения инструмента водовоздушными струями показана на рис. 127.

Упрочняемый инструмент 3 размещается у выходного сечения конической насадки 2 разрядной камеры 1, причем между упрочняемой поверхностью и рабочей жидкостью имеется воздушный зазор. При электроразряде в верхней части конической насадки образуется водо-воздушная струя, скорость которой в выходном сечении достигает 1500 м/с.

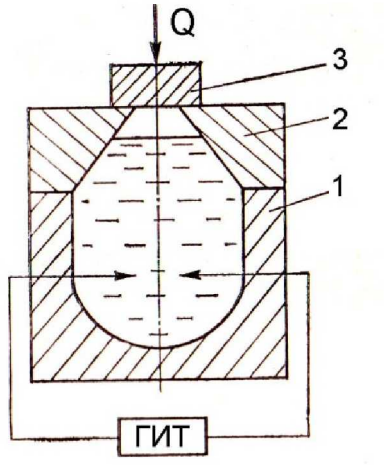


Рис. 127. Схема ЭГИ упрочнения металлов водовоздушными струями:
1 – разрядная камера; 2 – коническая насадка; 3 – инструмент

При взаимодействии струи с рабочей поверхностью инструмента происходит упрочнение поверхностного (150…300 мкм) слоя, в том числе за счет некоторых превращений остаточного аустенита в мартенсит, крупноблочного мартенсита в мелкодисперсный, перераспределения остаточных напряжений, выделения мелкодисперсных карбидов из перенасыщенных твердых растворов.

Микротвердость поверхностного слоя повышается на 20…35%, а остальной материал обладает исходными механическими свойствами (таблица 12).

Таблица 12. Изменение микротвердости металлов

Материал	Микротвердость $HV \cdot 10^7$ Н/м^2	
	Исходная	После ЭГИ упрочнения
ХВГ	730	990
Р9К5	790	1020
Х12М	680	910
У10А	630	820

Данный метод упрочнения металла является «мягким», позволяющий водяным струям обрабатывать сложные поверхности инструмента.

7.5.4. Электрогидравлическая очистка литья

Для получения в отливках различного вида полостей используются стрежни, изготавливаемые, например, из песчано-цементных смесей (рис. 128).

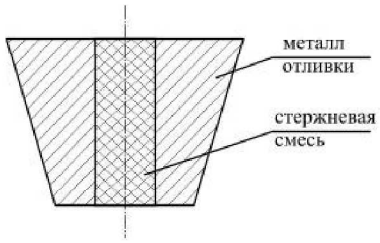


Рис. 128. Отливка со стержнем, формирующим внутреннюю полость

После заливки металла стержневые смеси из отливки должны быть удалены. Удаление стержней является очень трудоемкой и сложной задачей. В настоящее время в промышленности наиболее распространен «сухой» виброударный метод извлечения стержневых масс (рис. 129).

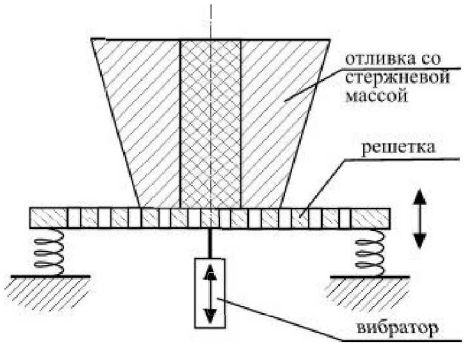


Рис. 129. Виброударный метод удаления стержневой смеси

Этот метод, применяемый для отливок малого веса, весьма трудоемок, требует большого объема ручных доводочных работ, не обеспечивает нужного качества. А если учесть низкие санитарно-гигиенические условия работы (пыль), будет понятна острота экологической проблемы.

Особенно остро проблема удаления стержневых масс стоит при производстве тяжелых отливок весом в несколько тонн.

Специалисты ПКБ «Электрогидравлика» впервые в мире разработали технологический процесс и оборудование для электрогидравлической выбивки стержней из отливок (рис. 130).

Отливка погружается в емкость с водой. Электрод, погруженный в ванну, движется по периметру обрабатываемой отливки. Периодически осуществляют электроразряд. Наиболее эффективной схемой воздействия при обработке отливки является схема с прямым разрядом на отливку.

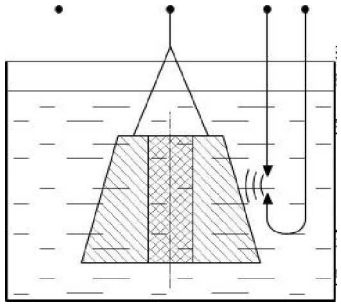


Рис. 130. Схема электрогидравлической очистки литья

Основная работа разрушения стержневых смесей выполняется за счет энергии ударной волны, но и роль гидропотока высока, так как он осуществляет вынос уже отделенных частей стержня из зоны воздействия.

На границе раздела сред металл-стержень часть падающей волны отражается, а часть переходит во вторую среду – стержень. Обратная волна в металле оторвет его от стержня, а прошедшая в стержень волна вызовет разрушение последнего.

В стержне всегда имеются внутренние дефекты, являющиеся концентраторами напряжений. Ударная волна, достигнув концентраторов, вызывает рост микротрещин и, в конечном счете, разрушение стержня.

Таким образом, создан новый «мокрый» способ удаления стержневых масс из отливок. Способ освоен промышленностью, и в настоящее время в литейных цехах работает около 250 установок, отличающихся по энергии и конструктивному исполнению. Операции технологического процесса очистки (транспортировка, перемещение электродов, удаление выбитой смеси и др.) механизированы и управляются дистанционно.

Достоинства нового способа очистки:

- возможность обработки отливок от нескольких кг до 25 тонн;
- повышение производительности труда в 5-6 раз по сравнению с существующими механическими способами (виброударными);
- улучшение санитарно-гигиенических условий труда (снижение запыленности в 10-20 раз);
- обеспечение высокого качества очистки;
- уменьшение расхода электроэнергии в 5-10 раз.

Если свести все преимущества к экономическому показателю – себестоимости очистки одной тонны отливок, то он снижается в 2–2, 5 раза.

7.5.5. Разрушение бетонных блоков

При реконструкции цехов обработки металлов давлением нередко стоит задача разрушения бетонных оснований (фундаментов), на которых устанавливалось и закреплялось оборудование. Наиболее распространенной операцией разрушения таких блоков является виброударное их разрушение отбойными молотками. Такой техпроцесс малопроизводителен, является физически тяжелым и небезопасным для здоровья человека.

Электрогидроимпульсная технология предусматривает: сверление отверстий ∅ 40 мм на глубину порядка 2/3 от толщины фундаментального блока; заливку в отверстие воды, погружение в отверстие с водой электродов и электроразряд в жидкости (рис. 131).

Электрогидроимпульсная технология разрушения бетонных блоков позволяет повысить производительность труда в десятки раз с одновременным улучшением условий труда рабочих.

Благодаря своим преимуществам, ЭГИШ находит свою нишу, эффективную, экономически выгодную, в общей цепочке технологии машиностроения.

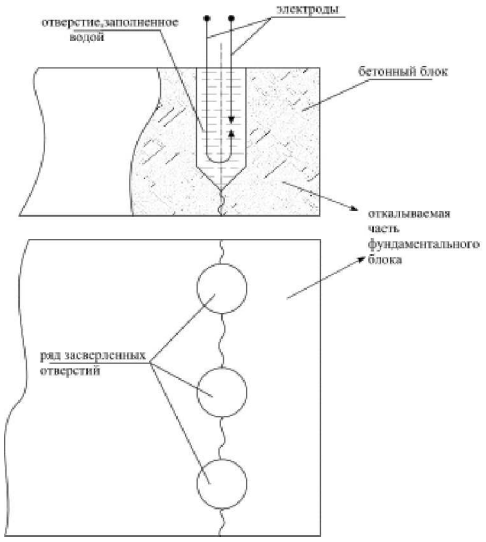


Рис. 131. Схема разрушения фундаментальных блоков

8. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ (МИОМ)

8.1. Физика процесса

Представление о физике процесса МИОМ начнем с описания демонстрационного эксперимента (рис. 132).

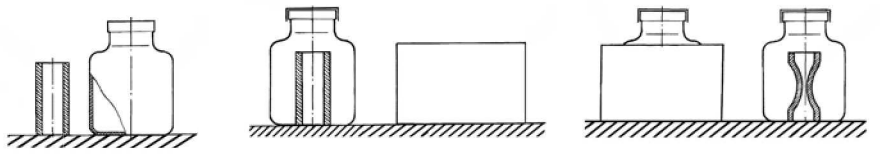


Рис. 132. Демонстрационный эксперимент

В стеклянную банку помещаем трубчатый образец из высокопрочного алюминиевого сплава. Банку закрываем крышкой и помещаем ее в черный ящик, но таким образом, чтобы крышка банки была все время в поле зрения, то есть ни в какой момент времени ее никто не открывал. Сосчитав до трех, банку извлекают из черного ящика. Алюминиевая труба внутри стеклянной целой банки деформирована. Как? Какими силами?

Прежде всего напомним о причине возникновения электродинамических сил: если по двум проводникам пропустить импульсный ток во встречном направлении, то такие проводники отталкиваются. Это результат взаимодействия магнитных полей двух проводников с током (рис. 133).

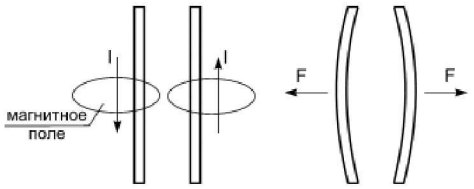


Рис. 133. Взаимодействие магнитных полей проводников с током I

Откроем черный ящик. Внутри его расположена катушка (соленоид) – индуктор, соединенный с магнитно-импульсной установкой (МИУ) (рис. 134).

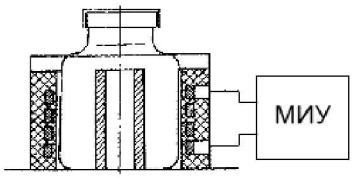


Рис. 134. Схема магнитно-импульсной обработки

Блок-схема магнитно-импульсной установки аналогична блок-схеме генератора импульсных токов при ЭГШ (рис.135), т.е. она также состоит из повышающего трансформатора 1, выпрямителя 2, батареи конденсаторов 3 и разрядника 4.

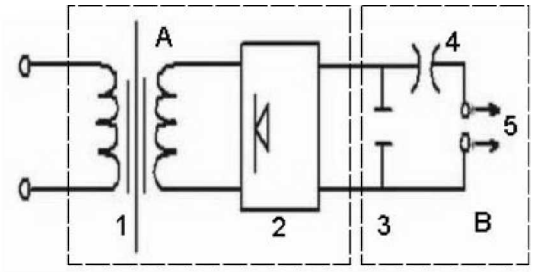


Рис. 135. Блок-схема магнитно-импульсной установки (МИУ)

К выводам установки 5, вместо электродов при ЭГШ, подсоединен индуктор. При включении разрядника разрядная цепь (батарея конденсаторов–индуктор) окажется замкнутой. Батарея конденсаторов разряжается на индуктор. В цепи разряда, в том числе через индуктор, течет ток (рис. 136) разряда батареи конденсаторов.

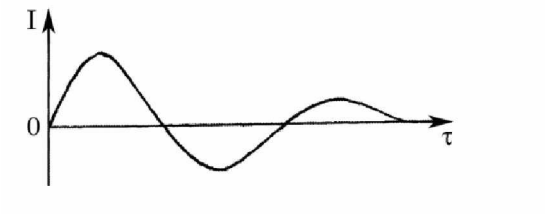


Рис. 136. Ток разряда батареи конденсаторов в индукторе

Этот ток, как видно из рис. 136, переменный, описываемый затухающей синусоидой. Вокруг спирали индуктора возникает переменное магнитное поле. Это поле беспрепятственно проходит через стеклянную стенку банки, пересекает алюминиевую заготовку и наводит в ней по закону Э.Х. Ленца вихревой ток, обратный по направлению току в индукторе.

Таким образом, мы имеем два проводника с током: один – индуктор, второй – заготовка, причем токи в этих двух проводниках текут в противоположном направлении. В результате возникают электродинамические силы отталкивания (рис. 137). Прочная катушка остается неподвижной, а заготовка под действием сил Р, отталкиваясь от нее, деформируется.

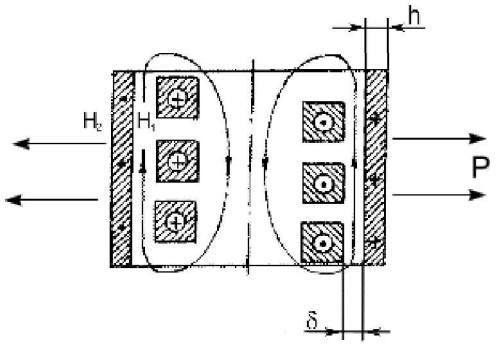


Рис. 137. Электродинамические силы в системе индуктор–заготовка

Давление магнитного поля на заготовку пропорционально разности квадратов напряженностей магнитных полей в зазоре между индуктором и заготовкой (H_1) и просочившегося через стенку заготовки поля (H_2).

$P = f(H_1^2 - H_2^2)$.

Если заготовка полностью экранирует магнитное поле, то есть оно не проходит (не просачивается) через стенку заготовки, то $H_2=0$ и давление магнитного поля – максимально $P = P_{max}$.

Если же магнитное поле беспрепятственно проникает через стенку заготовки (например, через стенку стеклянной банки), то $H_1=H_2$ и давление на такую заготовку равно нулю $P=0$.

Таким образом, для обеспечения максимального деформирующего усилия, максимального КПД процессов МИОМ с энергетической точки зрения необходимо создать условия (параметры), при которых магнитное поле не просачивалось бы через стенку заготовки.

Наведенные в заготовке вихревые токи распределены по ее толщине неравномерно: максимальны они со стороны индуктора и убывают в глубину металла по экспоненциальному закону (рис. 138).

Глубина Δ, на которой ток ослабевает в e = 2,7 раза по сравнению с током на поверхности, обращенной к индуктору, носит название «глубина проникновения тока» в металл заготовки.

Если $h > \Delta$, то ток по поверхности, противоположной индуктору, не течет, следовательно, и $H_2=0$. Это тот случай, к которому необходимо стремиться, чтобы получить P_{max} (вариант б).

Если же $\Delta > h$ (вариант а), то ток течет как по наружной, так и внутренней стороне заготовки, следовательно, $H_2 \neq 0$, поле просачивается через заготовку и оказываемое им давление на нее не будет максимальным.

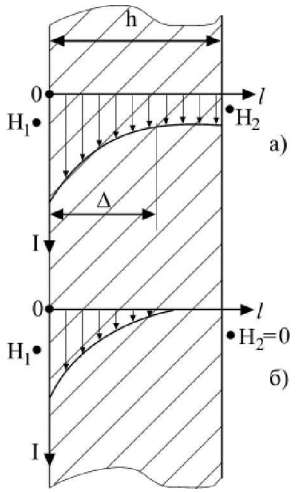


Рис. 138. Распределение вихревого тока по толщине заготовки ($\Delta < h$):
h – исходная толщина стенки заготовки; Δ – глубина проникновения тока
в металл заготовки (толщина скин-слоя)

Глубина проникновения тока в металл заготовки определяется по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu\mu_0}},$$

где ω – круговая частота разрядного тока: $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$;

γ – удельная электропроводность материала проводника (1/Ом·м);

μ_o – абсолютная магнитная проницаемость вакуума ($\mu_o = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м);

μ – магнитная проницаемость материала заготовки.

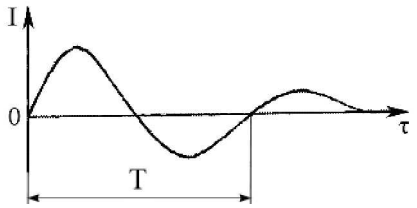
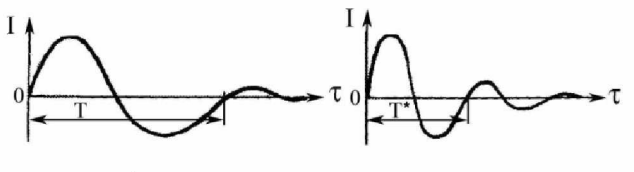


Рис. 139. Ток в цепи разряда батареи конденсаторов
(T – период колебания)

Круговая частота разрядного тока ω определяется активным R и индуктивным L сопротивлением разрядной цепи (установка – индуктор –

заготовка). Естественно, например, что ω для цепи с одновитковым индуктором будет отличаться от цепи с многовитковым индуктором. Кроме того, частота разрядного тока будет зависеть от параметров МИУ (типа конденсаторов, разрядника, сопротивления коммутирующих устройств и т.д.). Для таких цепей кривые разрядного тока будут различны.

Условно подразделим их на высоко- и низкочастотные (рис. 140).



а) б)

Рис. 140. Внешний вид токовых кривых в зависимости от параметров разрядной цепи: а) низкочастотная; б) высокочастотная разрядные цепи $T > T^*$

Из формулы видно, что для достижения P_{max}, то есть для выполнения условий $H_2 = 0$ и достижения $\Delta < h$, предпочтительно обеспечить параметры, приводящие к формированию высокочастотной цепи разряда.

Вторым параметром, определяющим значение Δ, является удельная электропроводность материала заготовки γ. Чем больше значение γ, тем меньше величина Δ. Отсюда следует, что магнитно-импульсной обработке более эффективно подвергать заготовки из хорошо электропроводного материала: медь, алюминий и их сплавы.

В таблице 13 приведены значения глубины проникновения тока в металл заготовки в зависимости от марки сплава и частотных характеристик разрядной цепи.

Таблица 13. Глубина проникновения тока

Марка материала	Глубина проникновения Δ, мм		
	f =1 кГц	f = 10 кГц	f = 30 кГц
Медь М1, М2, М3	2,12	0,67	0,34
Латунь Л62	3,86	1,22	0,71
Бронза БрБ2	4,15	1,31	1,12
АДМ	2,72	0,86	0,50
АМг6М	4,24	1,34	0,77
Д16М	3,25	1,02	0,59
МА8-М	3,60	1,14	0,66
Ст3	6,45	2,04	1,18
Х18Н9Т	13,50	4,20	2,46
ВТ5	18,70	5,91	3,41

Из табл. видно, что если обрабатывать импульсным магнитным полем медные заготовки при частоте разрядного контура 10 кГц, то, чтобы получить P_{max}, нужно, чтобы заготовка была толщиной больше 0,7 мм, а при f = 30 кГц – больше 0,4 мм. Это не значит, что нельзя деформировать медные заготовки с толщиной стенки меньше указанных значений 0,7 и 0,4. Обрабатывать их можно, но поле через них будет просачиваться; давление будет меньше максимального $P < P_{max}$, то есть КПД процесса снижается. Значения толщин штампуемых импульсным магнитным полем заготовок из алюминиевых сплавов при тех же частотных характеристиках с условием обеспечения P_{max} уже будут в 1,5 раза больше по сравнению с медными, для стальных – в 3…3,5 раза, а для титановых – уже почти в 9 раз.

С энергетической стороны давление магнитного поля на заготовку зависит от уровня электрической энергии, запасенной в батарее конденсаторов МИУ $W = CU^2 / 2$ (С – емкость конденсаторной батареи; U – напряжение батареи), и от геометрических размеров обрабатываемой заготовки, вернее объема пространства между индуктором и заготовкой V (рисунок 141).

$P = W/V = W/\pi Dl\delta.$

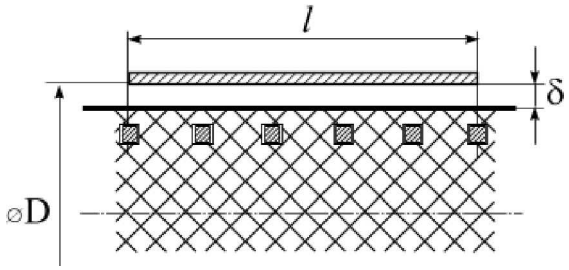


Рис. 141. Соотношение геометрических размеров заготовки и индуктора

Диаметр и длина заготовки определяются размерами готовой детали, то есть ее чертежом.

А величина зазора между индуктором и заготовкой δ – изменяемый параметр. Чем он меньше, тем больше величина давления Р при прочих равных условиях.

На практике с учетом изоляционного слоя этот зазор составляет 1,5 …2,0 мм, то есть при наладке технологической оснастки не требуется жесткой подгонки пуансона по матрице, как это осуществляется в инструментальных штампах.

Кроме рассмотренных явлений, в ряде случаев необходимо дополнительно учитывать такие факторы, как перераспределение токов от взаимного влияния близко расположенных проводников (эффект близости – эффект отталкивания противоположно направленных токов и притяжения при их одинаковом направлении), от формы индуктора (кольцевой эффект –

перетекание тока на внутреннюю поверхность из-за уменьшения активного сопротивления). Нередко встречается также такое явление, как «магнитная подушка»: просочившееся через заготовку магнитное поле наводит вихревые токи в оснастке; взаимодействие токов в оснастке и в заготовке может привести к возникновению противодавления.

Энергия магнитного поля расходуется не только на деформирование заготовки, но и на ее нагрев. Повышение температуры стенки заготовки за время импульса τ может быть оценено по формуле

$$\Delta T = \int_0^{\tau} \frac{RI_{\max}^2}{2VC_p\rho} d\tau, \quad ^{\circ}\text{C},$$

где $I_{\max}$ – максимальный ток в цепи разряда, А;

R – активное сопротивление разрядной цепи, Ом;

V – условный объем заготовки, через который протекает ток, м^3;

C_p – удельная теплоемкость материала заготовки, Дж/град.кг;

ρ – плотность материала заготовки, кг/м^3.

Время разряда τ составляет 10^{-4}…10^{-5} с, максимальное значение тока I в заготовке 50…200 кА.

При этих значениях τ и $I_{\max}$ величина ΔT для алюминиевых заготовок может достигать 80 … 150^{0}С.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Для возникновения электродинамических сил при магнитно-импульсной обработке необходимо, чтобы в деформируемой заготовке наводились вихревые токи, то есть чтобы заготовка была «замкнутой» для прохождения электрического тока.

2. Давление магнитного поля на заготовку является объемным, то есть приложенным не только к поверхности, но и к внутренним слоям металла, по которым протекает вихревой ток.

3. Силовое воздействие на заготовку является бесконтактным, нет механического воздействия на заготовку, следов деформирующего инструмента. Силовое воздействие осуществляется невидимым магнитным полем.

4. Для достижения максимального КПД процесса МИОМ, достижения максимального давления импульсного магнитного поля на заготовку необходимо, чтобы магнитное поле не «просачивалось» через стенку заготовки, то есть полностью ею экранировалось.

5. Просачиваемость магнитного поля через стенку заготовки определяется параметрами разрядной цепи, то есть параметрами системы «установка – индуктор – заготовка» и физическими свойствами материала заготовки (ее удельной электропроводимостью).

6. Глубина проникновения тока в металл заготовки должна быть меньше ее толщины (($\Delta < h$) – условие обеспечения $P_{\max)}$.

7. Для достижения P_{max} необходимо так спроектировать (рассчитать) разрядную цепь, чтобы обеспечить более высокочастотные характеристики разрядного тока.

8. Для магнитно-импульсной обработки предпочтительно выбирать номенклатуру деталей, изготавливаемых из хорошоэлектропроводных материалов: медь, алюминий, магний и их сплавы, малоуглеродистые стали.

9. Особенностью магнитно-импульсной обработки является возможность деформирования заготовки через стенки контейнера из магнитнопрозрачного материала (стекло, керамика и другие материалы), заполняемого, например, инертным газом, то есть вести обработку в защитной среде.

10. Зазор между индуктором и заготовкой должен быть минимально возможным (условие достижения P_{max}), реальная его величина 1,5…2,0 мм, что значительно превышает зазоры между пуансоном и матрицей инструментального штампа, облегчая наладку технологической оснастки при МИОМ.

11. При магнитно-импульсной обработке в заготовке наводятся вихревые токи в десятки и даже сотни килоампер, что вызывает разогрев заготовки. Однако температура нагрева не превышает значений температур фазовых превращений, тем более что время ее действия – миллисекунды.

12. Напряженность магнитного поля в зазоре индуктор – заготовка достигает значений 300 000 Гс (10^5 Эрстед).

13. При магнитно-импульсной обработке происходит прямое превращение электрической энергии, запасенной в батарее конденсаторов, в работу пластической деформации.

14. Магнитно-импульсное деформирование металлов характеризуется такими же параметрами динамического деформирования, как и взрывная и электрогидравлическая обработка: высокими скоростями деформирования заготовки V = 10…250 м/с, малым машинным временем – 10^{-4} …10^{-5} с.

8.2. Повышение технологической пластичности металла при магнитно-импульсном нагружении

Как показали экспериментальные исследования, при магнитно-импульсном нагружении наблюдается значительное повышение технологической пластичности, даже по сравнению со взрывным и электрогидроимпульсным нагружением. При одних и тех же скоростях деформирования 100…200 м/с или деформации коэффициент динамичности К (δ) имеет большие значения (таблица 14).

Таблица 14. Коэффициенты динамичности

Марка материала	АМг3М	Амг6М	Х18Н10Т	ВТ14
К (δ)	2,13 – 2,5	2,11 – 2,18	1,21 – 1,35	1,12 – 1,2

Причины повышения значений K (δ) в особенностях МИОМ, отличающих этот метод обработки от других высокоскоростных методов: влияние вихревых токов и электродинамических сил.

Действие вихревых токов сводится в первую очередь к дополнительному нагреву заготовки.

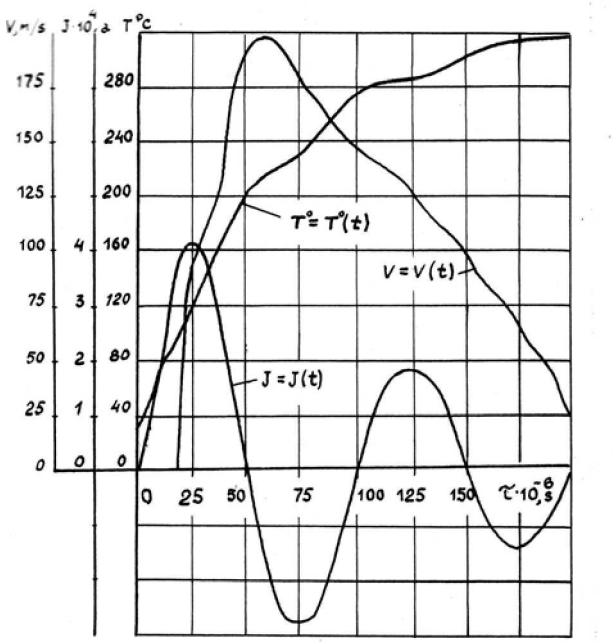


Рис. 142. Изменение температуры Т, скорости деформирования V и силы тока I во времени τ

На рис. 142 приведены в едином масштабе времени τ изменение температуры нагрева заготовки T, скорости деформирования V и разрядного тока I. Как видно из рисунка 76, к моменту трогания заготовки ее температура уже достигает порядка 75^0С. С увеличением энергии деформирования до 7 кДж температура нагрева заготовки может достичь уже 200^0С, что согласно диаграмме пластичности (рис. 143) и вызывает дополнительное увеличение предельной деформации.

Вихревой ток распределяется неравномерно не только в глубину металла заготовки (скин-эффект), но и вдоль образующей: над витками индуктора он имеет большие значения, чем в зазоре между ними (рис. 144).

Заготовку в этом случае можно условно рассматривать как проводники с параллельно направленными токами. А такие проводники испытывают электродинамические усилия осевого сжатия.

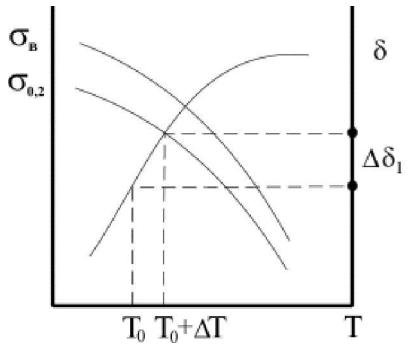


Рис. 143. Диаграмма пластичности

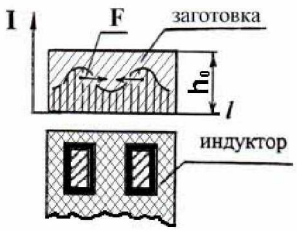


Рис. 144. Распределение вихревого тока по заготовке

Кроме того, осевой подпор может быть вызван специальным технологическим приемом – выдвижением витков индуктора за край заготовки (рис. 145). В этом случае взаимодействие токов в крайних витках индуктора с токами в заготовке и приведет к дополнительным осевым усилиям.

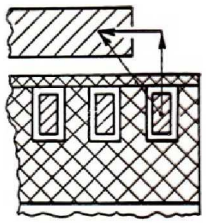


Рис. 145. Силовое давление, обусловленное взаимодействием токов в крайних витках индуктора и в заготовке

С учетом инерционных сил, в заготовке возникает уже не плоская схема напряжений, а объемная с двумя сжимающими напряжениями. Увеличение доли сжимающих напряжений (рис. 146) приводит к дополнительному увеличению предельных деформаций.

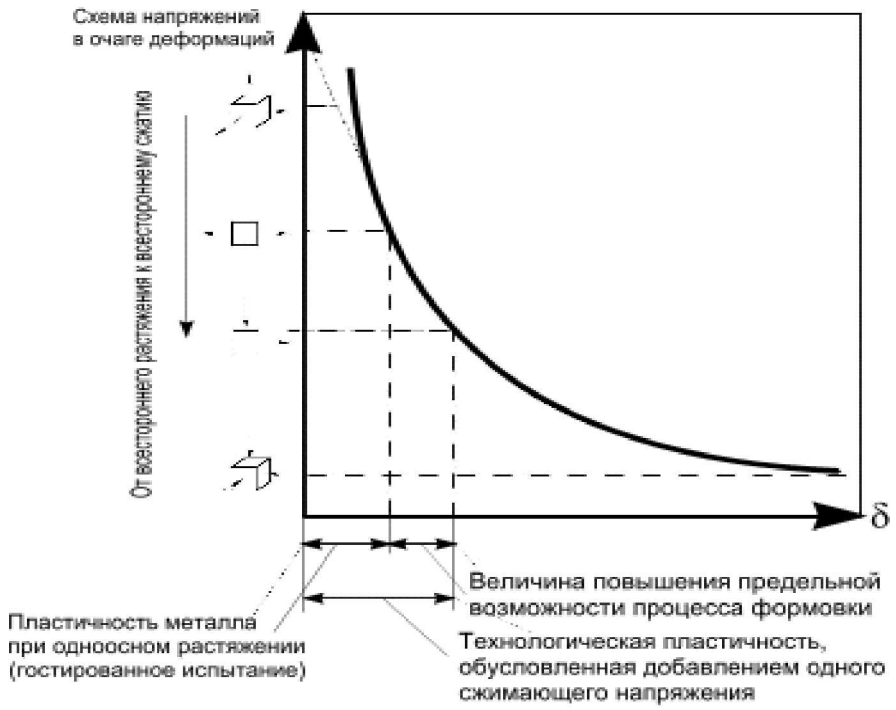


Рис. 146. Технологическая пластичность металлов

Еще одной причиной повышения пластических свойств металла при МИОМ является эффект так называемой электропластичности, связанный с влиянием потока электронов проводимости на движущиеся дислокации и дислокации в скоплениях.

Дополнительный фактор – импульсный ток, обтекая внутренние дефекты, например микротрещины (рис. 146), приводит к снижению их роли как концентраторов напряжений. В одних случаях импульсный ток вызывает оплавление острых вершин трещин (а), в других – приводит к возникновению сжимающих трещины электродинамических сил (б).



а) б)

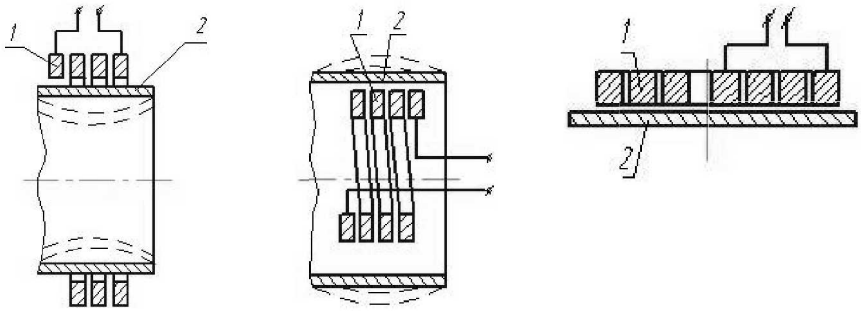
Рис. 147. Схема обтекания наведенным током микротрещин, расположенных в заготовке: а – поперек; б – вдоль протекания направления протекания тока

8.3. Технологические схемы МИОМ

Существует две группы технологических схем магнитно-импульсной обработки:

- технологические схемы непосредственного воздействия импульсного магнитного поля на заготовку;
- технологические схемы воздействия ИМП на заготовки через промежуточные твердые, эластичные, жидкостные среды.

К первой группе относятся технологические схемы на «обжим», на «раздачу» и плоская листовая штамповка (рис. 148).



а) б) в)

Рис. 148. Схемы штамповки а) на «обжим»; б) на «раздачу»; в) плоская листовая: 1 – индуктор; 2 – заготовка

При использовании технологической схемы «обжим» трубчатая заготовка размещается внутри цилиндрического индуктора. Электродинамические усилия стремятся сжать заготовку, уменьшить диаметр.

В технологической схеме «раздача» заготовка располагается снаружи индуктора. Давление ИМП стремится раздать заготовку, увеличить ее диаметр.

В технологической схеме плоской листовой штамповки используется спиральный плоский индуктор, например спираль Архимеда, над которым располагается обрабатываемая плоская заготовка.

Ко второй группе относится технологическая схема штамповки с использованием «спутника» (рис. 149).

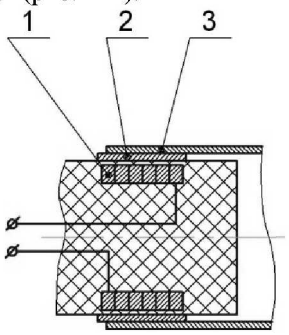


Рис. 149. Схема штамповки со «спутником»: 1 – индуктор;
2 – спутник; 3 – заготовка

В качестве «спутника» используется заготовка из хорошо электропроводного материала. Например, это намотанная в несколько слоев алюминиевая фольга.

Применение «спутников» позволяет обрабатывать (передавать усилие) заготовки из плохо электропроводных материалов. После совместного деформирования заготовки и «спутника» последний удаляется из заготовки.

Другая технологическая схема этой группы – магнитно-импульсный привод (рис. 150).

В этих схемах магнитно-импульсное усилие передается на привод, который далее либо непосредственно деформирует металл (например, электромагнитный молоток для клепки), либо осуществляет деформирование заготовки через еще одно промежуточное тело – эластичную среду.

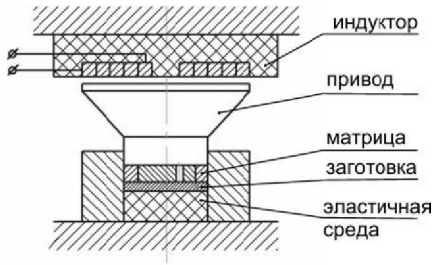


Рис. 150. Схема магнитно-импульсного привода

8.4. Индукторные системы для магнитно-импульсной обработки

Индуктор является инструментом для магнитно-импульсной обработки. Существует большое количество вариантов его конструктивного выполнения: одно- и многовитковые; на раздачу, на обжим или плоские катушки, точеные, витые и т.д.

Типовая конструкция цилиндрического витого индуктора «на раздачу» представлена на рис. 151.

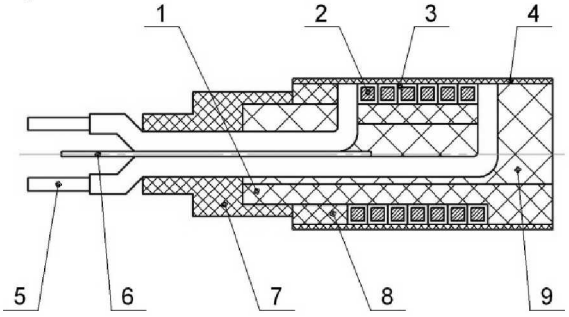


Рис. 151. Цилиндрический индуктор «на раздачу»: 1 – основание; 2 – токопровод; 3 – витковая изоляция; 4 – главная изоляция; 5 – выводы; 6 – изоляционная прокладка; 7 – бандаж; 8 – стяжное кольцо

Он представляет собой электромеханическую систему, основными элементами которой являются:

1. Токопровод 2 (изолированная шинка), выпускаемый кабельной промышленностью, сечением, например: 4×5; 3×7; 2×9 и т.д. В качестве изоляции 3 применяется лавсановая пленка. Эта изоляция носит название «витковой» и служит для предотвращения межвиткового электрического пробоя. Напряжение между витками равно рабочему напряжению, деленному на количество витков ($U_в = U_р/n$).

2. Основание 1 (оправка), на которую наматывается токопровод, изготавливается из диэлектрического материала и воспринимает электродинамические усилия со стороны токопровода. Внутри оправки выполнены каналы для укладки концов токопровода и оформления их в виде выводов 5, с помощью которых индуктор подключается к магнитно-импульсной установке.

3. В процессе рабочего разряда по виткам токопровода протекает ток в одинаковом направлении. В результате между витками возникают динамические силы притяжения. При многократном притяжении в результате соударения витков между собой может быть разрушена витковая изоляция. Для предотвращения динамической подвижности витков их предварительно сжимают (стягивают) и фиксируют в таком положении с помощью стяжных колец 8.

4. Снаружи на изолированный токопровод наносят главную изоляцию 4, которая предотвращает электрический пробой между витками токопровода и заготовкой, между которыми действует полное рабочее напряжение U_p. Главная изоляция, как правило, также изготавливается из лавсановой пленки.

Одной из характеристик изоляции является ее электрическая прочность. Для лавсановой пленки она составляет 40 кВ на мм. Зная рабочее напряжение и характеристику электрической прочности изоляционного материала, определяют толщину витковой и главной изоляции.

5. Для защиты главной изоляции от механических повреждений снаружи индуктор покрывают прочным диэлектрическим материалом. Так, например, механическая защита может быть выполнена намоткой стеклоленты, пропитанной эпоксидной смолой.

Перечисленные основные элементы индуктора: токопровод, основание, витковая и главная изоляция, стяжные кольца, механическое усиление или защита используются в любых конструкциях индукторных систем.

В серийном производстве при большой частоте следования импульсов-разрядов возникает проблема перегрева индуктора, так как по токопроводу течет ток в сотни килоампер. Развиваемых при этом температур изоляция не выдерживает. В этом случае конструкция индуктора должна предусматривать элементы охлаждения, отвода тепла от токопровода или изоляции. Одно из таких решений – применение полого токопровода (трубки), по которому прокачивается охлаждающая жидкость.

Форма индуктора определяется формой заготовки. Ее геометрия может отличаться от цилиндрической (по сечению) и от прямолинейной (по образующей). При обработке прямоугольных, овальных, полых заготовок форма индуктора должна быть соответствующей (рис. 152).

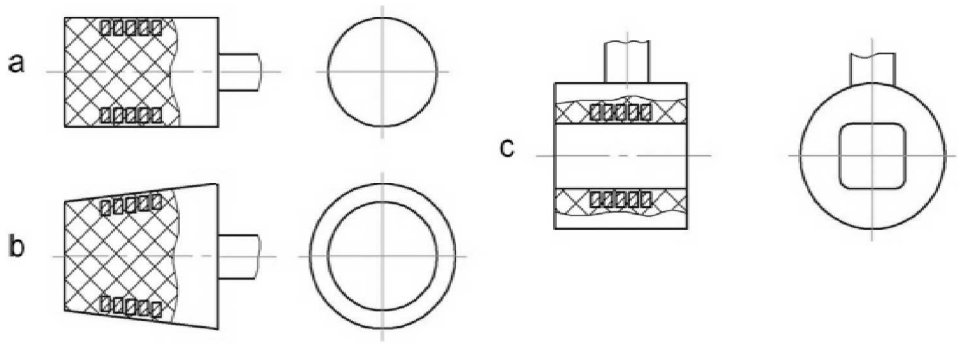


Рис. 152. Возможные формы поперечного сечения индуктора:
a – цилиндрический; b – конический; c – квадратный

Аналогично и образующая индуктора определяется формой заготовки: ожевальной, конусной, сложной формы (рис. 153).

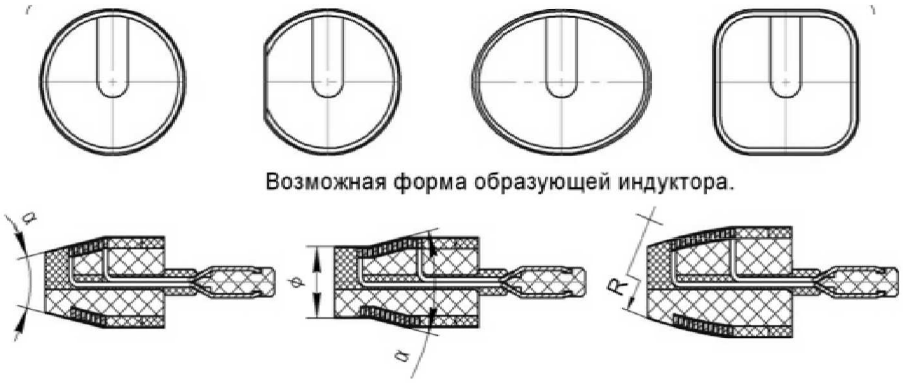


Рис. 153. Возможные формы образующей индукторов

Для плоских индукторов, чтобы обеспечить протекание токов по деформируемой поверхности, то есть чтобы не было «мертвых зон» для протекания тока, форма наматываемой спирали должна повторять геометрию заготовки (рис. 154): круглой, прямоугольной, треугольной, овальной и т.д.

Индуктор по своим электрическим параметрам должен обеспечить максимальный КПД передачи энергии заготовке. Поэтому расчет индуктора сводится к определению оптимального количества витков N, которое нужно разместить на деформируемом участке заготовки. Например, для индуктора «на раздачу» это количество определяется по следующей формуле:

$$N = \sqrt{\frac{K_1 L_{dc} K_e l_c}{\pi \mu_0 (D_i - \delta)(1 - K_1)}},$$

где D_i – внутренний диаметр заготовки;

L_{dc} – паразитная индуктивность подводящего к индуктору тракта;

δ – величина зазора между индуктором и заготовкой;

K_e – коэффициент, учитывающий потери энергии на создание поля во внутренней полости индуктора;

K_1 – коэффициент согласования;

l_c – длина рабочей зоны индуктора.

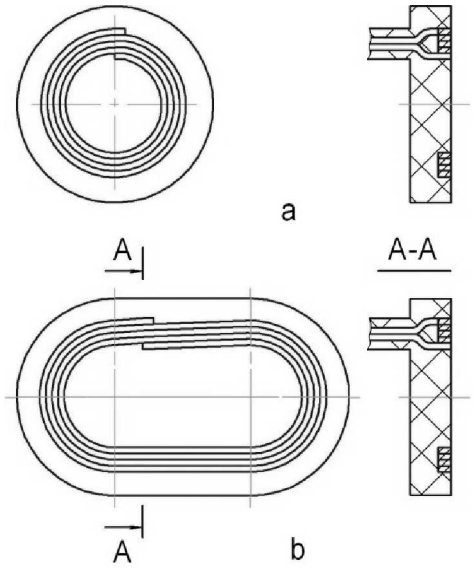


Рис. 154. Возможные формы индуктора для плоской штамповки

На практике величина геометрического зазора δ между индуктором и заготовкой составляет 1,5…2,0 мм.

Основной задачей при проектировании и изготовлении индукторных систем является задача обеспечения их достаточного для производства ресурса без значительного увеличения стоимости.

В настоящее время ресурс витых многовитковых индукторных систем может составлять 10 000 импульсов, а одновитковых, точеных – на порядок больше.

8.5. Примеры технологического применения импульсных магнитных полей в листовой штамповке

В качестве заготовок для магнитно-импульсной обработки используют полые (трубчатые, коробчатые, конусные и другой формы) и листовые заготовки. Выполняемые операции: разделительные, формообразующие, калибровочные, сборочные.

8.5.1. Разделительные операции для полых заготовок

1. Разрезка труб на мерные длины с перпендикулярной, наклонной или фигурной линией реза по отношению к оси заготовки.
2. Обрезка припуска у полых деталей.
3. Пробивка отверстий.

Технологические схемы этих операций приведены на рис. 155, 156, 157.

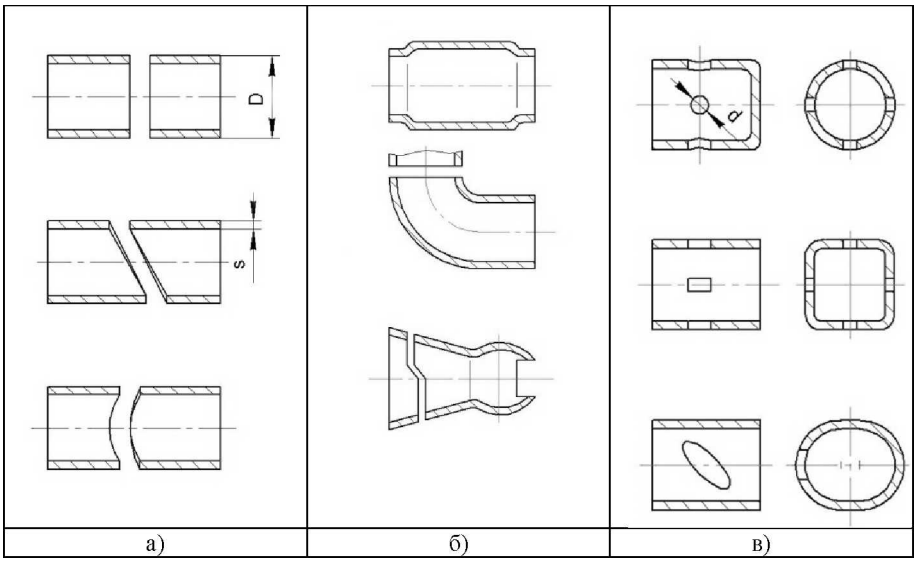


Рис. 155. Возможные операции резки труб: а) с перпендикулярной и наклонной линией реза «на раздачу» и «обжим»; б) обрезка припуска; в) пробивка отверстий

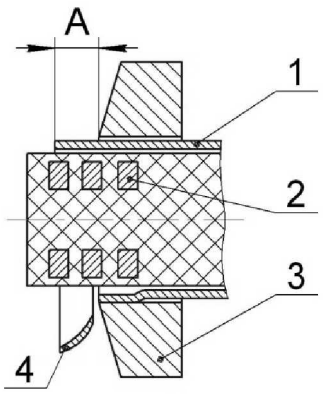


Рис. 156. Схема обрезки припуска «на раздачу»: 1 – заготовка; 2 – индуктор; 3 – матрица; 4 – обрезанный припуск (отход)

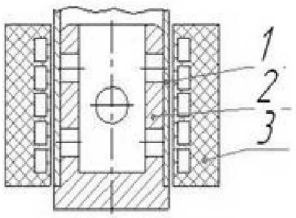


Рис. 157. Схема групповой пробивки отверстий «на обжим»:
1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – индуктор

Основные преимущества разделительных процессов МИОМ:

1. Высокая производительность
2. Высокое качество готовой продукции:

- отсутствие заусенцев вследствие высоких скоростей деформирования;
- скругление поверхности реза со стороны действия ИМП как результат начальной вытяжки отхода (рис. 158);

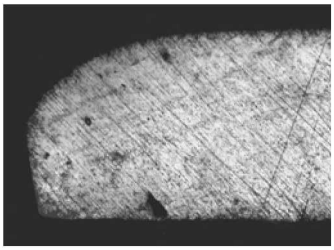


Рис. 158. Форма кромки детали после вырезки

- калибровка зоны, прилегающей к поверхности разделения по 9-11 квалитетам, так как длина рабочей зоны индуктора, а следовательно, и давление ИМП выходит за режущие кромки инструмента (рис. 159);

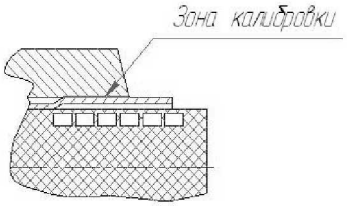


Рис. 159. Обрезка припуска и калибровка зоны, прилегающей
к линии реза

- не требуется дополнительной торцовки детали для обеспечения, например, перпендикулярности поверхности разделения к оси заготовки (рис. 160).

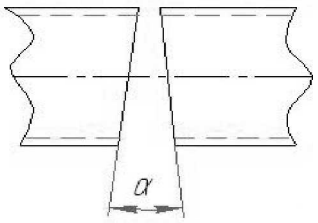


Рис. 160. Обеспечение перпендикулярности линии реза

Перпендикулярность линии реза и точность получения заданного угла α определяется точностью изготовления оснастки;

- шероховатость поверхности реза алюминиевых заготовок $R_z = 40…20$.

3. Нет необходимости в точной подгонке «пуансона по матрице», как это требуется в инструментальном штампе.

Индуктор и оснастка размещаются относительно друг друга с большим допуском по оси – 0,5…1,5 мм. Радиальный зазор между индуктором и заготовкой может составить 0,5 мм.

4. Простота технологической оснастки.

Величина припуска на обрезку или отхода при разрезке на мерные длины составляет 5…7 толщин заготовки.

Можно осуществлять резку и с меньшими значениями отхода, но тогда, в соответствии с полученным графиком (рис. 161), потребуется значительное повышение потребной энергии разделения. Это приведет к резкому снижению ресурса МИУ и индуктора.

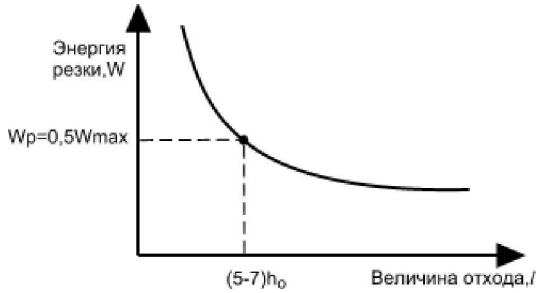


Рис. 161. Зависимость потребной энергии резки от величины отхода l при обрезке припуска и разрезке на мерные длины труб с толщиной стенки h_o

Как показали расчеты, для обеспечения ресурса МИУ, равного 10^6 импульсов, необходимо, чтобы рабочие энергии разрядов составляли половину от W_{max} установки.

В качестве ограничений и недостатков следует отметить:

- возможность резки заготовок из хорошо электропроводных материалов;
- ограничение толщин разделяемых материалов, как правило, не больше 1,5 мм;
- требование по обеспечению безопасности от разлетающихся осколков;
- невозможность осуществления резки по схеме «на раздачу» труб малых диаметров (< 30 мм) из-за сложности изготовления и малой стойкости таких индукторов.

На рис. 162 в качестве примера показаны образцы деталей, при производстве которых использовались операции магнитно-импульсной резки.

На рис. 163 представлены образцы деталей, отверстия в которых пробивались с использованием энергии импульсного магнитного поля.

Форма пробиваемых отверстий может быть разной: круглой, прямоугольной, сложной.

На рис. 164 представлен образец промышленной оснастки, удовлетворяющей мерам техники безопасности. Приспособление имеет корпус, предотвращающий разлет заготовок.



Рис. 162. Образцы деталей, полученных с использованием операций магнитно-импульсной резки

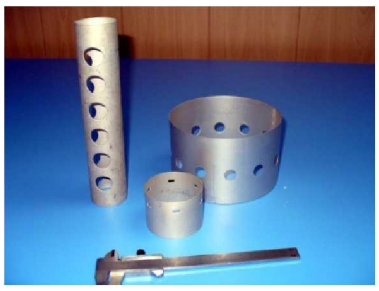


Рис. 163. Пробивка отверстий в деталях с использованием энергии импульсного магнитного поля



Рис. 164. Внешний вид промышленного приспособления
для обрезки припуска у полых деталей (сварных труб)

Работа приспособления состоит в следующем: заготовка размещается внутри матрицы. Разметочная линия обрезки совмещается с режущей кромкой матрицы. Заготовка закрепляется в призматических зажимах. Далее заготовка с матрицей и зажимами по направляющим подается до упора на индуктор вовнутрь защитного корпуса. Упор обеспечивает необходимое позиционирование индуктора относительно режущей кромки матрицы. Одновременно при подаче заготовки на индуктор осуществляется перемещение выталкивателя отхода, сжатие соответствующих пружин.

Таким образом, обрезка припуска происходит в закрытом объеме. При обратном ходе матрицы выталкиватель удаляет осколки припуска. Призмы разжимаются, деталь вынимается из матрицы. Весь цикл обрезки занимает не более 10…15 с.

На плоских заготовках осуществляют операции вырубки-пробивки как непосредственно импульсным магнитным полем, так и через промежуточную, например, эластичную среду (рис. 165).

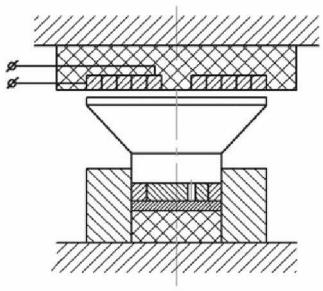


Рис. 165. Вырубка-пробивка отверстий через промежуточную среду

Технологический процесс вырубки-пробивки через эластичную среду рекомендуется для получения деталей вне зависимости от электрической проводимости заготовки.

8.5.2. Формообразующие магнитно-импульсные операции

С помощью магнитно-импульсных формообразующих операций из полых заготовок получают конуса, переходники, рифты, фланцы, оболочки, детали сложной формы (рис. 166) с использованием технологических схем как «на раздачу», так и «на обжим».

На плоских заготовках производят в основном операции гибки-формовки, в том числе отбортовки наружного и внутреннего контура (рис. 167).



Рис. 166. Детали, полученные формовкой импульсным магнитным полем

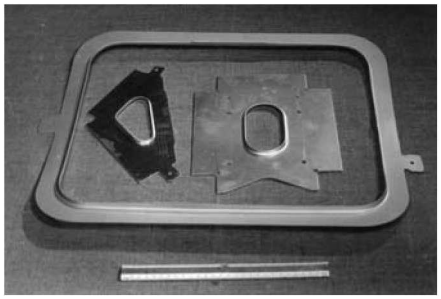


Рис. 167. Плоские детали, отштампованные с применением ИМП

На рис. 166 приведены фотографии деталей, полученных с использованием магнитно-импульсных формообразующих технологий, а на рис. 168 – промышленная оснастка для формовки «конуса».

Основные преимущества магнитно-импульсной формовки:

1. Простота технологической оснастки, легкость ее наладки.

2. Высокие степени деформации за один штамповочный переход; уменьшение количества переходов.

3. Высокая точность готовых деталей (вплоть до 5 квалитета) за счет калибрующего упруго-пластического удара. Но при этом нужно, чтобы для материала оснастки этот удар был только упругим (таблица 15).



Рис. 168. Технологическая оснастка для формовки «конуса»

Таблица 15. Изменение окружной деформации заготовки (АМг6М) после соударения с матрицей (Сталь 45)

V_1, м/с / ε_φ, %	5	10	15	20	25	30	35	40
5	0,66	0,73	0,78	0,81	0,90	0,96	0,98	1,05
10	0,78	0,81	0,86	0,92	0,96	0,99	1,07	1,15
15	0,83	0,90	0,98	0,96	1,04	1,08	1,15	1,20
20	0,93	0,95	0,98	1,05	1,09	1,12	1,20	1,24

4. Возможность формообразования концов длинномерных изделий. Изготовленные переходники, фланцы, конусы в дальнейшем привариваются к трубопроводу (рис. 169).

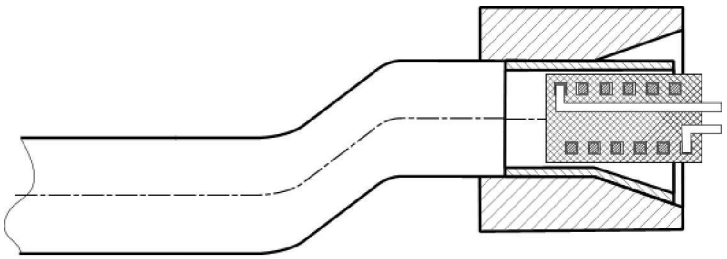


Рис. 169. Формообразование длинномерных изделий

Деформировать концы длинномерных изделий на прессах не позволяет их открытая высота.

Магнитно-импульсная формовка не имеет таких ограничений, так как индуктор к установке может быть подключен гибким кабелем (рис. 170).

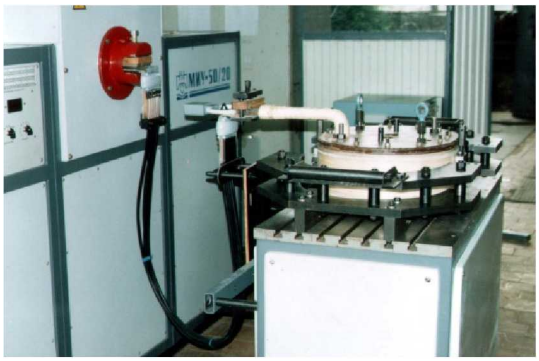


Рис. 170. Подключение индуктора к установке гибким кабелем

В результате отпадает технология сварки, повышается надежность трубопроводной системы летательного аппарата.

5. Метод позволяет осуществлять поэлементную штамповку, подключая в необходимой последовательности определенные витки индуктора с помощью электрических «отпаек» индуктора (б, в, г, д, е) (рис. 171).

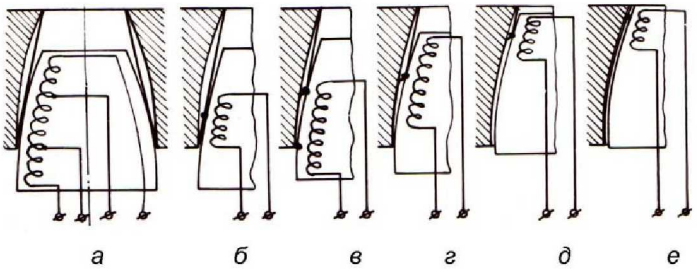


Рис. 171. Схема поэлементного формообразования оболочки:
а – показаны все секции индуктора; *б, в, г, д, е* – показаны только активные секции данного перехода

Так, подсоединив к установке нужные выводы индуктора, можно осуществить деформацию центральной части заготовки, затем последовательно деформировать краевые части оболочки.

Такая технология позволяет получать крупногабаритные детали (∅ 1000 × 1000 мм) на установках средней энергоемкости, но за несколько переходов.

В качестве ограничений и недостатков операций магнитно-импульсной формовки можно отметить:

- невозможность деформирования «на раздачу» труб диаметром менее 30-40 мм;
- необходимость использования «спутников» при обработке заготовок из плохо электропроводных материалов;
- недостаточная стойкость индукторных систем малого диаметра;
- повышенные требования по технике безопасности при работе на установках свыше 1000 В.

8.5.3. Магнитно-импульсная калибровка

Магнитно-импульсная калибровка как самостоятельная операция применяется для обеспечения высокоточной подгонки друг к другу свариваемых деталей (рис. 172), для перевода технологии сварки с ручного на автоматический режим.

В этом случае калибровке подвергаются концы свариваемых деталей. Превышение кромок Δ не более 0,1 h_0.

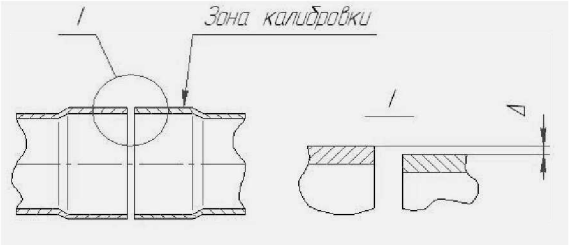


Рис. 172. Магнитно-импульсная калибровка

Хорошо зарекомендовала себя калибровка труб под пайку, роликовую сварку. При этом обеспечивается заданный зазор между соединяемыми деталями.

При необходимости может быть откалибрована вся деталь, например ее аэродинамический контур.

С помощью магнитно-импульсной калибровки могут быть устранены местные дефекты, вмятины от ударов.

8.5.4. Магнитно-импульсная сборка

Среди всех операций МИОМ наибольшее распространение получили операции магнитно-импульсной сборки (МИС).

Операции МИС применяются для образования натяга между деталями (используется технологическая схема «на обжим») или сборочное соединение

образуется за счет формообразующих операций, то есть формообразование одной из соединяемых деталей по поверхности другой.

Первый вид сборочного соединения применяется взамен осевых и радиальных посадок, где требуется выполнение (обеспечение) очень жестких расчетных допусков между соединяемыми с натягом деталями.

При магнитно-импульсной сборке (обжиме) допускá между деталями свободные, возможен даже зазор в 0,5…1,0 мм, в котором заготовка может успеть приобрести достаточно высокую скорость деформирования.

При этом происходит не только окружная (тангенциальная) пластическая деформация, но и объемная пластическая деформация по толщине, приводящая к заполнению материалом заготовки микронеровностей контрдетали (рис. 173), что обеспечивает герметичность соединения, повышенное усилие выпрессовки.

Высокие значения усилия выпрессовки даже после среза микронеровностей объясняются действием дополнительных термических (действие вихревых токов) напряжений, возникающих в заготовке после ее обжатия и охлаждения.

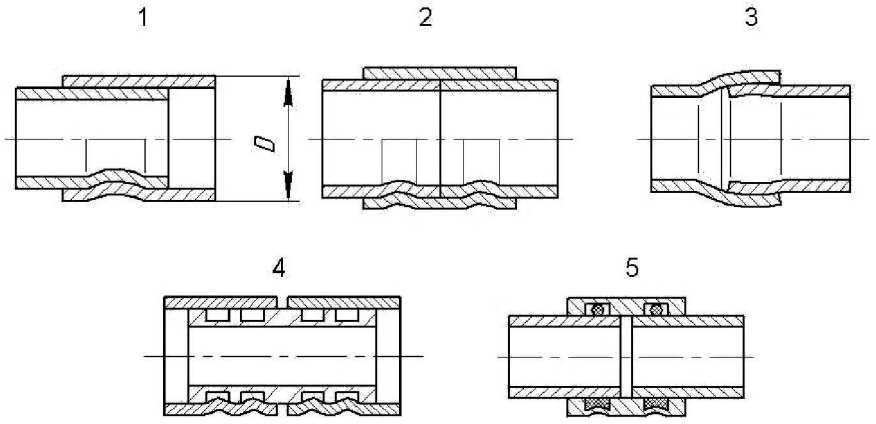


Рис. 173. Возможные операции магнитно-импульсной сборки

Импульсный кратковременный характер силового воздействия, значительные инерционные силы и термические напряжения позволяют получить соединения типа металл–неметалл: алюминий–углепластик; медь (алюминий)–стекло (фарфор) и т.д.

Примером магнитно-импульсной сборки геометрическим замыканием может служить технология укупорки бутылок (пенициллиновых пузырьков), технологическая схема которой приведена на рис. 174. При этом используется операция завальцовки.

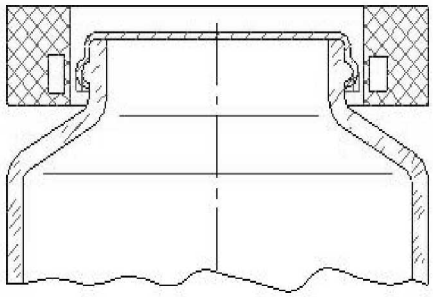


Рис. 174. Завальцовка стеклянных бутылок

На рис. 175 показана технологическая схема сборки трубы с металлической законцовкой.

Такие соединения используются при изготовлении спортивных снарядов, тяг управления и т.д. Выполняемая технологическая операция – зиговка. Получаемое соединение – неразъемное.

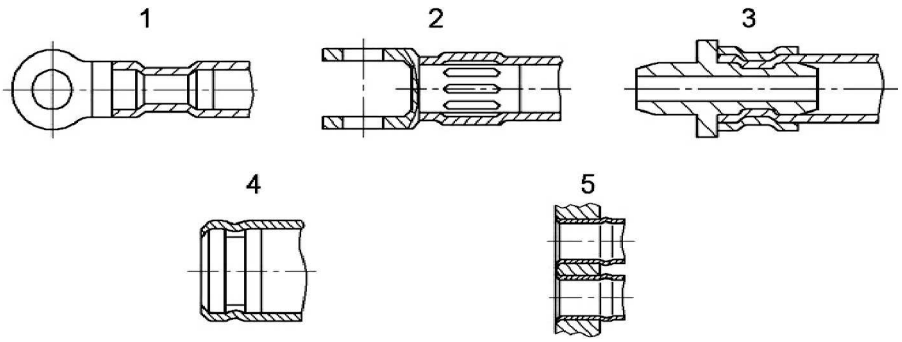


Рис. 175. Схемы сборки трубчатых деталей с законцовками

Магнитно-импульсная сборка в ряде случаев определяет конструкцию соединения, то есть создаваемое конструктором соединение изначально ориентировано на магнитно-импульсную сборку. Так, например, сборочный узел голеностопного протеза, представленный на рис. 176, предусматривал калибровку трубы с точностью ± 0,05 мм, установки ее в механически обработанную полость литой детали, сверление поперечных отверстий под заклепочное или болтовое соединения.

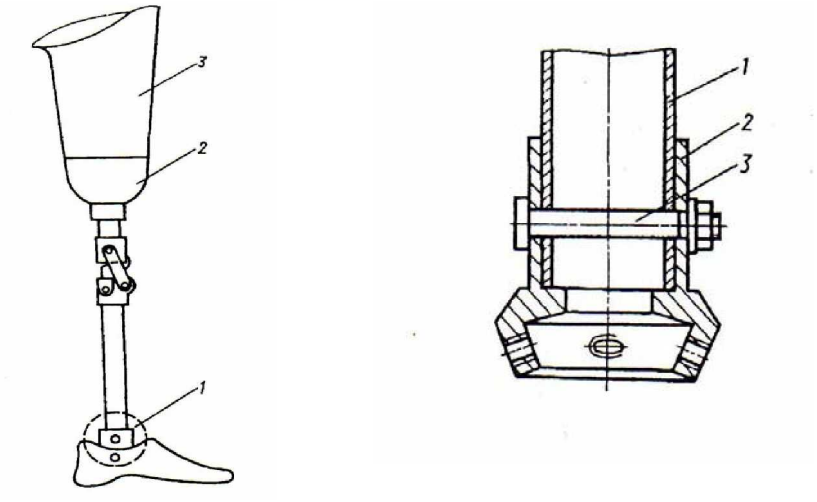


Рис. 176. Схема протеза ноги: 1 – узел крепления голени к стопе; 2 – чашка приемной гильзы; 3 – приемная гильза

Если же ориентироваться на магнитно-импульсную сборку, то конструкция сборочного узла будет иметь совершенно другой вид (рис. 177).

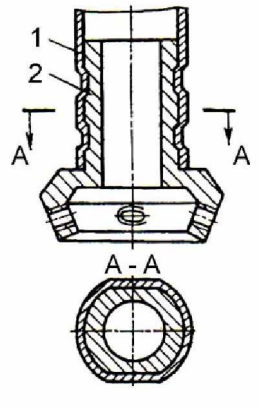


Рис. 177. Конструкция сборочного узла при магнитно-импульсной сборке: 1 – труба; 2 – корпус

Труба *1* вставляется не внутрь, а снаружи литого корпуса *2*, на поверхности которого протачивается неглубокая (1… 1, 5) S_0 канавка. Труба одевается на корпус свободно с зазором 0,5 мм и обжимается ИМП. Таким образом, отпадает операция калибровки, клепки, уменьшается вес протеза,

повышается качество соединения (нет зазоров, нет подвижных элементов), обеспечивается высокая производительность процесса сборки.

На фотографии (рис. 178) показаны примеры сборочных соединений, нашедших применение в промышленности: сборка предохранителей, биметаллических заземлителей, наконечников электрожгутов, тросов и многих других.



Рис. 178. Детали, полученные магнитно-импульсной сборкой

Преимущества и особенности магнитно-импульсной сборки:

- равномерность приложения нагрузки по периметру, что обеспечивает высокое качество соединения;
- кратковременность приложения нагрузки позволяет использовать контрдетали из хрупких материалов без следов разрушения;
- термические напряжения, возникающие в охватывающей детали как результат ее охлаждения после разогрева вихревыми токами, повышают прочность соединения, его ресурс, герметичность;
- нет необходимости в обеспечении жестких допусков между соединяемыми деталями;
- простота технологической оснастки;
- высокая производительность.

В качестве ограничения можно отметить весьма редкое использование для сборки технологической схемы «на раздачу» и ограничение по электропроводности материала деформируемой детали.

Во всех импульсных методах обработки основными расчетными технологическими параметрами является потребная для деформирования энергия.

8.5.5. Реализация процессов МИОМ

Для реализации процессов МИОМ в промышленности создано специализированное оборудование: магнитно-импульсные установки

различной мощности и инструменты (индукторы) для выполнения различных технологических операций.



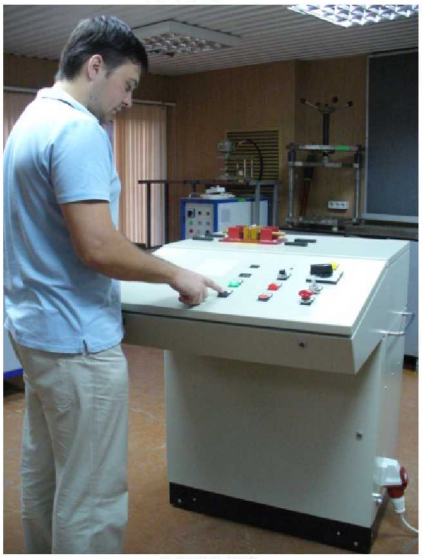
МИУ-1



МИУ-3



МИУ-10



МИУ-3У

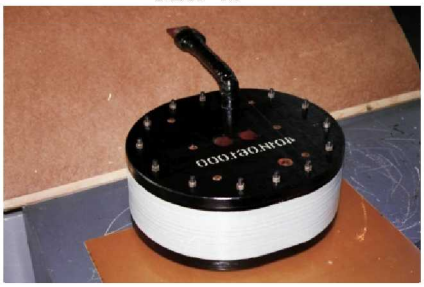




МИУ-50



МИУ-30



Индукторы «на раздачу»

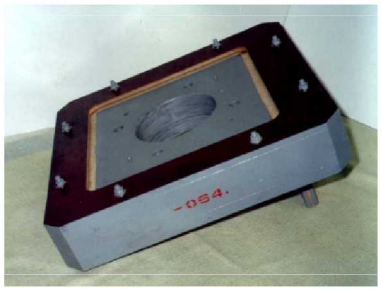


Плоский индуктор



Индуктор «на обжим»





Специальные индукторы для отбортовки

8.6. Расчёт потребной энергии формообразования при динамических методах деформирования

Полная работа, или потребная энергия формообразования для получения готовой детали, определяется из выражения:

$$A = \int_{v}[\int_{o}^{e_i} \sigma_i(e_i)de_i)]dV .$$

Для единичного объема удельная работа или удельная энергия формообразования, будет:

$$a = \int_{o}^{e_i} \sigma_i(e_i)de_i,$$

где σ_i – интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2} ,$$

а e_i – интенсивность деформаций

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(e_1-e_2)^2+(e_2-e_3)^2+(e_3-e_1)^2} .$$

Принимая степенную аппроксимацию кривой упрочнения, зависимость $\sigma_i(e_i)$ можно представить в виде

$$\sigma_i = ke_i^n,$$

где k,n – коэффициенты степенной аппроксимации кривой упрочнения.

Тогда выражение для удельной энергии формообразования преобразуется к виду

$$a = \int_{o}^{e_i} ke_i^n de_i = \frac{k}{1+n}e_i^{1+n}$$

и полная энергия формообразования

$$\text{A} = aV = \frac{k}{1+n}e_i^{1+n}V,$$

где V – объем деформируемого материала.

Рассмотрим конкретный пример:

Чертеж готовой детали приведен на рис. 179; исходной заготовки – на рис. 180; технологическая схема изготовления такой детали с использованием импульсных технологий – на рис. 181.

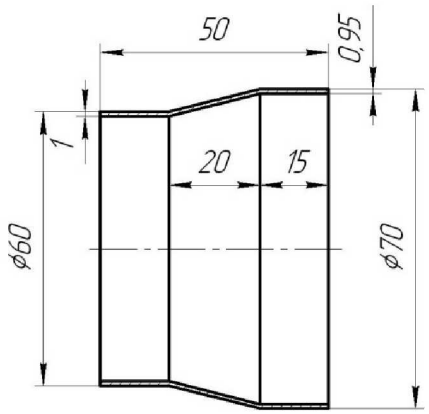


Рис. 179. Готовая деталь – «переходник»

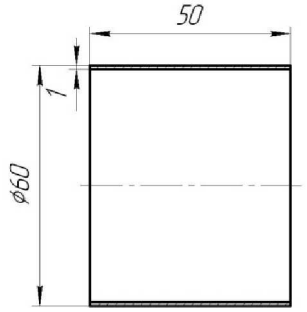


Рис. 180. Трубчатая заготовка

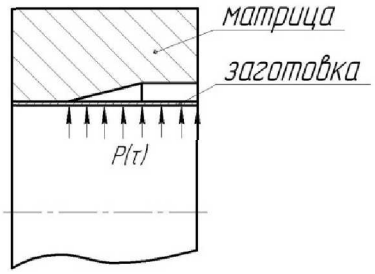


Рис. 181. Технологическая схема формовки «переходника»

Механические свойства металла заготовки:
$\sigma_в$ = 25 кг/мм^2, $\sigma_{0,2}$ = 15 кг/мм^2, δ = 0,12, E = 7000 кг/мм^2;
коэффициенты динамичности:
$K(\sigma_в)$ = 1,1 $K(\sigma_{0,2})$ = 1,3 $K(\delta)$ = 1,5.

Порядок расчета

1. Расчет констант динамических свойств металла

$$\sigma_в^{дин} = \sigma_в \cdot K\sigma_1; \ldots\ldots \sigma_в^{дин} = 25 \cdot 1{,}1 = 27{,}5 \text{кг/ мм}^2;$$

$$\sigma_{0,2}^{дин} = \sigma_{0,2} \cdot K\sigma_{0,2}; \ldots \sigma_{0,2}^{дин} = 15 \cdot 1{,}3 = 19{,}5 \text{кг/ мм}^2;$$

$$\delta^{дин} = \delta K(\delta); \ldots\ldots \delta^{дин} = 0{,}12 \cdot 1{,}5 = 0{,}18.$$

2. Определение истинных констант механических свойств

Истинный предел прочности

$$S_в = \sigma_в^{дин}(1+\delta^{дин}) = 27,5(1+0,18) = 32,45\,кг/мм^2.$$

Истинный предел текучести

$$S_{0,2} \approx \sigma_{0,2}^{дин} = 19,5\,кг/мм^2.$$

Истинная деформация, соответствующая истинному пределу текучести

$$e_{0,2} = 0,002 + \frac{S_{0,2}}{E} = 0,002 + \frac{19,5}{7000} = 0,005.$$

Истинная деформация, соответствующая истинному пределу прочности

$e_в = \delta = 0,18$.

3. Расчет коэффициентов степенной аппроксимации

Степенная аппроксимирующая кривая должна пройти через две точки: предел текучести ($S_{0,2}$, $e_{0,2}$) и предел прочности ($S_в$, $e_в$).

$$S_{0,2} = ke_{0,2}^n,$$

$$S_в = ke_в^n.$$

Решая эту систему двух уравнений, получим:

$$n = \frac{\ln(S_в/S_{0,2})}{\ln(e_в/e_{0,2})};.....k = \frac{S_в}{e_в^n},$$

$$n = \frac{\ln\frac{32,45}{19,5}}{\ln\frac{0,18}{0,005}} = 0,14;.....k = \frac{32,45}{0,18^{0,14}} = 41,4\,кг/мм^2.$$

4. Используя закон аддитивности, разобьем деталь на две расчетные части: цилиндрическую и конусную. Полная работа будет равна сумме потребных работ для получения цилиндрической и конусной частей

$A = A_ц + A_к$.

5. Определение деформаций цилиндрической части детали

$$e_\theta = \ln\frac{D_k}{D_0};.....e_\theta = \ln\frac{70}{60} = 0,154;$$

$$e_t = \ln\frac{t_k}{t_o};.....e_t = \ln\frac{0,95}{1} = -0,051;$$

третью осевую деформацию найдем из закона постоянства объема

$e_\theta + e_t + e_z = 0$, $e_z = -0,103$.

Интенсивность деформации для цилиндрической части:

$$e_{i(ц)} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(e_1-e_2)^2+(e_2-e_3)^2+(e_3-e_1)^2},$$

при этом $e_1 > e_2 > e_3$ с учетом знака

$e_1 = e_\theta = 0{,}154$,

$e_2 = e_t = -0{,}051$,

$e_3 = e_z = -0{,}103$,

$$e_{i(ц)} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{[0{,}154-(-0{,}051)]^2+[0{,}151-(-0{,}103)]^2+[(0{,}103)-(-0{,}154)]^2} = 0{,}14$$

6. Удельная работа деформации цилиндра составит

$$a_ц = \frac{k}{1+n}e_{i(ц)}^{1+n} = \frac{41.4}{1+0{,}14}0{,}14^{1+0{,}14} = 3{,}86\,\text{кг/мм}^2.$$

7. Деформируемый объем металла (цилиндрической части)

$V_ц = 2\pi R \cdot t_k \cdot l_ц = \pi \cdot 70 \cdot 0{,}95 \cdot 15 = 3132$ мм^3.

8. Полная энергия формообразования цилиндрической части детали

$A = a_ц \cdot V_{(ц)} = 3{,}86 \cdot 3132 = 12089{,}5$ кгмм = 12,1 кгм, что составляет 118,7 Дж ≈ 0,12 кДж.

Теперь перейдем к расчету потребной энергии формообразования для конусной части детали.

9. Для конусной части последовательность расчета аналогична: расчет деформаций, затем интенсивности $[e_{i(k)}]$. Однако деформации для конуса переменны и в двух крайних точках они уже определены: 0 и $e_{i(ц)} = 0{,}14$. Поэтому можно найти сразу $e_{i(k)}$ как среднюю величину $e_{i(k)} = 0{,}07$.

10. Расчет удельной работы деформации $a_{i(k)}$

$$a_{i(k)} = \frac{k}{1+n}e_{i(k)}^{1+n} = \frac{41{,}4}{1+0{,}14}0{,}07^{1+0{,}14} = 1{,}75\,\text{кг/мм}^2.$$

11. Деформируемый объем конусной части можно определить через объем той же части исходного цилиндра:

$V_k = \pi D_0 \cdot t_0 \cdot l_k = \pi 60 \cdot 1{,}0 \cdot 20 = 3768$ мм^3.

12. Полная работа деформации, или потребная энергия для формообразования конусной части, равна $A_к = a_{i(k)} \cdot V_k = 1{,}75 \cdot 3768 = 6594$ кгмм = = 6,5 кгм, что составляет 63,8 Дж = 0,063 кДж.

Полная работа деформации и потребная энергия для получения типовой детали (рис. 1П) равна

$A = A_ц + A_к = 0{,}12 + 0{,}063 = 0{,}183$ кДж.

Если для изготовления данной детали планируется использовать магнитно-импульсную технологию формообразования с КПД процесса, равным 7 %, то можно рассчитать энергию заряда батареи конденсаторов МИУ

$$W = \frac{A}{\eta} = \frac{0{,}183}{0{,}07} = 2{,}6\,кДж.$$

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ВЫВОДЫ

1. Идеальных методов листовой штамповки, пригодных «для всех случаев жизни», не существует.

2. Многообразие форм деталей, марок материала, требований по качеству, условий производства является причиной совершенствования и разработки новых видов листовой штамповки.

3. Каждый из созданных новых видов является результатом решения конкретных специальных задач по устранению технических недостатков или повышению экономической эффективности производства. Поэтому этим новым нетрадиционным методам листовой штамповки условно дано название «специальных».

4. Систематизацию специальных видов листовой штамповки можно осуществить по следующим шести признакам: источник нагружения, передающая усилие среда, параметры внешнего воздействия, вид и физико-механические свойства материала заготовки, параметры интенсификации, особые требования по качеству.

5. Существует несколько технологических схем штамповки эластичными средами: закрытая (контейнерная), открытая, полуоткрытая, закрытая безконтейнерная.

6. В качестве эластичных сред используются резины и полиуретаны. Их выбор для штамповки определяется физико-механическими свойствами: твёрдостью, относительным удлинением, остаточной деформацией и предельным давлением.

7. С использованием эластичных сред реализуются технологические процессы вырубки-пробивки, гибки, формовки, вытяжки. При получении деталей из листовых и полых заготовок, прессованных профилей.

8. Статические и динамические виды листовой штамповки отличаются друг от друга временем и скоростями деформирования или деформации, причем это отличие не в несколько раз, а на порядки.

9. Особенностью динамического деформирования является возможность возникновения волновых эффектов в деформируемом металле.

10. Волновые эффекты объясняют некоторые особенности динамического деформирования: характерные конечные формы деталей, их точность, распределение деформаций и др.

11. При расчете параметров динамического деформирования необходимо учитывать изменение механических свойств металла от скорости деформации.

12. С увеличением скорости деформации численные значения констант механических свойств для большинства деформируемых металлов возрастают.

13. Взрыв – выделение большой энергии в ограниченном объеме за минимальный промежуток времени.

14. Взрывчатые вещества (ВВ) могут быть газообразными и твердыми (конденсированными). Твердые ВВ могут быть выполнены в виде шнуров, пластин, сфер.

15. Выбор вида ВВ определяется его главным свойством – энерговыделением. Кроме того, учитываются такие его свойства, как бризантность, фугасность, физическая и химическая стойкость.

16. На практике реализуются два вида взрыва: медленный и быстрый.

Медленный – когда химическая реакция протекает одновременно во всем объеме; быстрый – реакция распространяется от слоя к слою со скоростью детонационной волны.

17. Разработано и используется несколько технологических схем взрывной обработки: бассейновая, бронекамерная, вакуумная, с использованием пресс-пушки, непосредственного воздействия на объект.

18. Преимущества взрывной обработки: отсутствие оборудования; высокие давления, расширяющие технологические возможности по габаритным размерам и свойствам обрабатываемых деталей; высокая точность готовых деталей.

19. Основные направления использования энергии ВВ в технологических целях: штамповка, упрочнение, сварка, брикетирование порошков и стружки.

20. Электрогидравлический эффект – высоковольтный разряд в жидкости.

21. Силовое воздействие на объект – ударные волны и гидропоток.

22. Оборудование для электрогидроэффекта – электротехническая установка, включающая повышающий трансформатор, выпрямитель, батарею конденсаторов, разрядник, электроды.

23. Существуют различные конструкции электродных систем: линейные, коаксиальные, одно- и многоточечные и др.

24. С энергетической точки зрения эффективность электроимпульсного воздействия зависит от напряжения; расстояния между электродами; энергии, запасенной в конденсаторной батарее; расстояния от электродов до объекта и других факторов.

25. Область применения: штамповка, очистка литья от стержневых масс, брикетирование, разрушение фундаментных блоков, упрочнение и др.

26. В основе магнитно-импульсной обработки – воздействие на объект импульсным магнитным полем высокой напряженности. Нагружение является «бесконтактным», объемным, невидимым магнитным полем.

27. Деформированию подвергаются образцы, детали из хорошо электропроводных материалов.

28. Магнитно-импульсные установки имеют зарядный (повышающий трансформатор, выпрямитель) и разрядный контур (батарею конденсаторов, разрядник). В установках нет подвижных элементов.

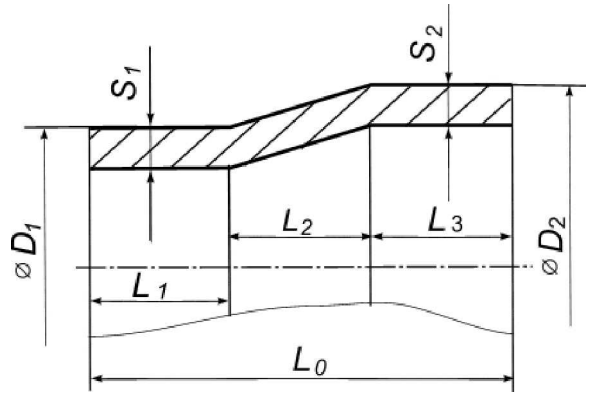
29. В качестве инструмента при магнитно-импульсной обработке используется индуктор (катушка).

30. Форма индуктора определяется формой заготовки и выбранной схемой обработки: «на раздачу», «на обжим», «плоская», одно- и многовитковые, витые и точеные.

31. Область применения: штамповка, сборка, сварка, клепка и другие.

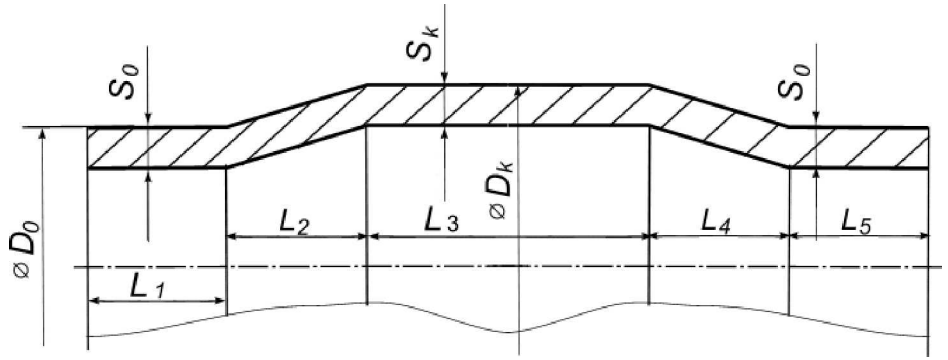
КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ по определению потребной энергии динамического формообразования

Задание 1



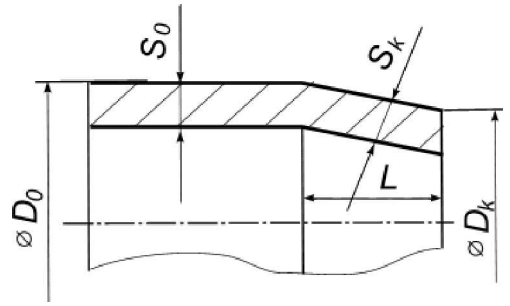
Вар.	D_0	S_0	L_0	D_1	S_1	D_2	S_2	L_1	L_2	L_3	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	$K_{\sigma_в}$	$K_{\sigma_{0,2}}$	K_δ	E
1	50	1,2	60	53	1,15	65	1,15	15	25	20	30	20	0,15	1,1	1,2	1,4	7000
2	60	1,5	60	62	1,48	80	1,45	15	25	20	40	30	0,1	1,1	1,2	1,3	7000
3	70	1,0	60	74	0,98	85	0,93	15	25	20	35	15	0,2	1,05	1,15	1,3	7000

Задание 2



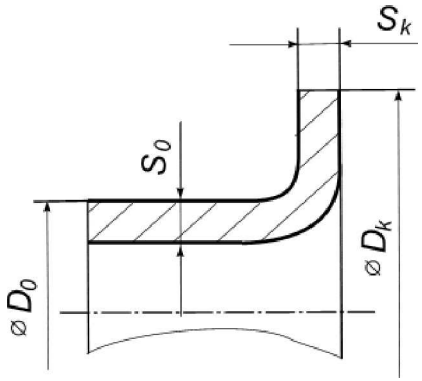
Вар.	D_0	S_0	D_k	S_k	L_1=L_2	L_2-=L_4	L_3	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	$K_{\sigma_в}$	$K_{\sigma_{0,2}}$	K_δ	E
1	50	1,0	60	0,92	20	30	30	10	5	0,3	1,1	1,2	1,3	7000
2	60	1,5	75	1,45	20	30	30	25	15	0,2	1,1	1,2	1,35	7000
3	65	2,0	85	1,87	20	30	30	35	20	0,15	1,1	1,25	1,4	7000

Задание 3



Вар.	D_0	S_0	D_k	S_k	L	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	$K_{\sigma_в}$	$K_{\sigma_{0,2}}$	K_δ	E
1	40	2,0	35	2,1	30	10	5	0,2	1,1	1,2	1,3	7000
2	50	3,0	40	3,1	30	20	15	0,1	1,05	1,2	1,4	7000
3	60	2,0	40	2,1	30	30	20	0,1	1,1	1,2	1,35	7000

Задание 4



Вар.	D_0	S_0	D_k	S_k	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	$K_{\sigma_в}$	$K_{\sigma_{0,2}}$	K_δ	E
1	80	2,0	95	1,91	20	10	0,3	1,1	1,2	1,3	7000
2	60	1,0	70	0,97	30	15	0,2	1,05	1,25	1,4	7000
3	50	0,8	60	0,77	40	20	0,1	1,15	1,25	1,35	7000

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация специальных видов листовой штамповки.
2. Возможные технологические схемы штамповки эластичной средой.
3. Марки и свойства эластичных сред.
4. Контейнеры для штамповки эластичными средами.
5. Оборудование, используемое для штамповки эластичными средами.
6. Технологическая схема вырубки-пробивки эластичной средой.
7. Механизм разделения металла при вырубке-пробивке эластичными средами.
8. Характер (геометрия) поверхности разделения при вырубке-пробивке.
9. Параметры, определяемые при проектировании процесса вырубки-пробивки эластичными средами.
10. Технико-экономическая эффективность процессов вырубки-пробивки эластичными средами.
11. Гибка и гибка-формовка. Определение. Схемы.
12. Технологическая схема гибки эластичной средой в закрытом объеме.
13. Примеры (технологические схемы) гибки в открытых объемах.
14. Параметры, определяемые при проектировании технологического процесса гибки эластичными средами.
15. Учет пружинения при гибке эластичными средами.
16. Технологические схемы рельефной штамповки.
17. Особенности рельефной штамповки эластичными средами.
18. Параметры, определяемые при проектировании процесса рельефной штамповки эластичными средами.
19. Технологические схемы вытяжки эластичными средами.
20. Технологическая схема гибки, малковки, подсечки прессованных профилей.
21. Технологические схемы формовки полых заготовок эластичными средами.
22. Роль трения в процессах штамповки эластичными средами.
23. Скорость деформации, скорость деформирования. Расчетные формулы. Связь показателей между собой. Их значения для статических и динамических процессов ОМД.
24. Свойства металлов при высоких скоростях деформирования.
25. Причины повышения технологической пластичности металла при высокоскоростном деформировании.
26. Коэффициенты динамичности и их использование в процессах ОМД.
27. Волновые эффекты в процессах ОМД.
28. Упругие и пластические волны напряжений в металлах при высокоскоростном нагружении.
29. Скорость каких волн напряжений, упругих или пластических, больше? Почему?
30. Пределы текучести каких из двух металлов (Ст3 и Х18Н10Т) в большей степени изменяются с увеличением скорости деформации? Почему?

31. Пластичность металла увеличивается или уменьшается с увеличением $\dot{e}$? Почему?
32. Перечислите известные вам методы высокоскоростного деформирования; приведите технологические схемы.
33. Классификация импульсных методов деформирования.
34. Преимущества и недостатки бассейновой штамповки взрывом.
35. Пресс-пушка. Конструкция. Область применения.
36. Быстрое и медленное горение. Определение и расчет давления при взрыве.
37. Технологические схемы взрывной обработки.
38. Сварка взрывом. Схема. Применение.
39. Примеры применения энергии взрыва в машиностроении (штамповка, упрочнение).
40. Технологическая схема, физика процесса огневого удаления заусенцев в закрытых полостях.
41. Физика процесса взрывной обработки.
42. Газообразные взрывчатые вещества.
43. Твердые взрывчатые вещества. Развиваемые давления.
44. Преимущества и недостатки штамповки в бронекамерах.
45. Физика процесса высоковольтного разряда в жидкости.
46. Параметры, определяющие эффективность электрогидравлического воздействия на заготовку.
47. Примеры использования электрогидравлического эффекта в технике.
48. Физика образования сборочных соединений при магнитно-импульсной обработке.
49. Основные блоки электрогидравлического оборудования (прессов).
50. Конструкции электродных систем при электрогидравлической штамповке.
51. Примеры использования энергии ИМП при выполнении формообразующих операций. Преимущества и недостатки.
52. Блок-схема магнитно-импульсной установки.
53. Какие параметры, свойства металла определяют эффективность магнитно-импульсной обработки?
54. Технологические схемы магнитно-импульсной резки.
55. Примеры использования энергии ИМП при выполнении сборочных операций. Преимущества и недостатки.
56. Конструкции индукторных систем.
57. Физика процесса магнитно-импульсного нагружения.
58. Скин-слой и его роль при магнитно-импульсной обработке.
59. Примеры использования энергии ИМП при выполнении разделительных операций. Преимущества и недостатки.
60. Технологические схемы магнитно-импульсной формовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В.П.Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979 . – 513 с.

2. Зубцов, М.Е. Листовая штамповка [Текст] / М.Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.

3. Резка труб на заготовки [Текст] / [В.Б. Чижик-Полейко и др.]. – М.:НИИМАШ, 1976. – 48 с.

4. Акаро, И.Л. Разрезка проката и труб на заготовки под штамповку [Текст] / И.Л. Акаро, И.С.Поляков. – М.: МАМИ, 1972. – 132 с.

5. Горяйнов, В.И. Анализ способов резки труб сдвигом [Текст] / В.И. Горяйнов, В.В. Белошицкий // Проектирование деталей машин и механизмов: Труды Ярославского технологического института. – Ярославль, 1970. – С. 240-257.

6. Добровольский, И.Г. Безотходные и малоотходные технологии резки труб [Текст] / И.Г. Добровольский, В.К. Жикленков, А.В. Степаненко – Минск: Изд. Госплана БССР, 1988. – 38 с. – (обзор. информ / Сер.55.13 №Технология машиностроения / Белорусский НИИНТИ Госплана БССР).

7. А.с. 1558576 В23Д 23/04. Способ разделения труб/ В.А. Глущенков, Г.З. Исарович, С.Г. Симагина, А.Е. Бурмистров, Ю.М. Овчинников (СССР). – № 4332496/27; Заявлено 23.11.87; Опубл.23.04.90; Бюлл. № 15. – 2 с.

8. Glushchenkov, V.A. Analysis of methods of thin walled pipe cutting in specified lengths [Text]/V.A. Glushchenkov, G.Z. Isarovich, A.E. Burmistrov, S.G. Simagina //Proceedings of the 5th Inter-national conference on metal forming, Györ, 19-21 June 1991. – Miskolz, 1991. – P. 218-224.

9. Исаченков, Е.И. Штамповка резиной и жидкостью [Текст] / Е.И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.

10. Абибов, А.Л. Технология самолетостроения [Текст]/ А.Л. Абибов, Н.М. Бирюков, В.В. Бойцов. – М.: Машиностроение, 1970. – 589 с.

11. Бутузов, Е.А. Специальные виды штамповки [Текст] / Е.А. Бутузов. – М.: Высшая школа, 1962. – 206 с.

12. РДМУ 95-77. Методические указания по проектированию технологической оснастки для штамповки деталей из листовых материалов эластичной средой [Текст]. – М.: Изд-во стандартов,1978. – 68 с.

13. РТМ 1516-75. Вырезка и пробивка деталей из листа полиуретаном [Текст]. – М.:НИАТ, 1977. – 72 с.

14. Ходырев, В.А. Применение полиуретана в листоштамповочном производстве [Текст] / В.А. Ходырев. – Пермь, 1973. – 220 с.

15. Попов, Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е.А. Попов, В.Г. Коновалов, И.Н. Шубин. – М.: Изд-во МГТУ, 2003. – 480 с.

16. Горбунов, М.Н. Штамповка деталей из труб [Текст] / М.Н. Горбунов. - М.: Машгиз, 1960. – 186 с.

17. Шалавин, В.В. Штамповка деталей из прессованных профилей эластичной средой [Текст] / В.В. Шалавин, А.Д. Комаров, Ф.В. Киров //

Штамповка в мелкосерийном производстве: Материалы семинара. – М.: МДНТП, 1979. – С.79-85.

18. Шалавин, В.В. Штамповка деталей из прессованных профилей эластичной средой [Текст] / В.В. Шалавин, А.Д. Комаров, Ф.В. Киров // Штамповка в мелкосерийном производстве: Материалы семинара. – М.: МДНТП, 1979. – С.3-26.

19. Глущенков, В.А. Специальные виды штамповки. Ч. 1. Штамповка эластичными средами [Текст]: учеб. пособие / В.А. Глущенков. – Самара: СГАУ, 2008. – 72 с.

20. Пихтовников, Р.В. Штамповка листовых металлов взрывом [Текст] / Р.В. Пихтовников, В.М. Завьялова. – М.: Машиностроение, 1964. – 174 с.

21. Чачин, В.Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов [Текст] / В.Н. Чачин. – Минск: Наука и техника, 1978. – 184 с.

22. Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов [Текст] / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.

23. Высокоскоростное деформирование металлов [Текст] / под ред. А.И. Шахназарова. – М.: Машиностроение, 1966.

24. Орленко, Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках [Текст] / Л.П. Орленко. – М.: Машиностроение, 1964.

25. Погодин-Алексеев, Г.И. Динамическая прочность и хрупкость металлов [Текст] / Г.И. Погодин-Алексеев. – М.: Машиностроение, 1966. – 243 с.

26. Петров, М.В. Методы исследования деформационных и прочностных свойств материалов при магнитно-импульсном нагружении [Текст] / М.В. Петров. – Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 2007. – 84 с.

27. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов [Текст] / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1961. – 417 с.

28. Хардин, В.Б. Особенности деформации металла при магнитно-импульсной штамповке [Текст] / В.Б. Хардин, А.Д. Комаров, Д.Н. Лысенко, В.А. Глущенков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 4.

29. Райнхарт, Дж.С. Взрывная обработка металлов [Текст]/ Дж.С. Райнхарт, Дж. Пирсон; пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 391 с.

30. Гулый, Г.А. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах [Текст] / Г.А. Гулый, П.П. Малюшевский. – Киев: Наукова думка, 1977. – 176 с.

31. Ракошиц, Г.С. Электроимпульсная штамповка [Текст] / Г.С. Ракошиц. – М.: Высшая школа, 1990. – 191 с.

32. Бутузов, Е.А. Специальные виды штамповки [Текст] / Е.А. Бутузов. – М.: Высшая школа, 1962. – 206 с.

33. Баранов, Ю.В. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы [Текст] / Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов. – М.: МГИУ, 2011. – 844 с.

Учебное издание

Глущенков Владимир Александрович

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Учебник

Редакторская обработка Ю.Н. Литвинова
Доверстка А.В. Ярославцева

Подписано в печать 04.03.2013. Формат 60×84 $^{1/16}$.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 10,75.
Тираж 20. Заказ . Арт. – 5/2013.

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34