

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П.КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

В. А. Глущенко

Специальные виды штамповки

Часть 2. Динамические методы деформирования

Электронное учебное пособие

САМАРА
2011

УДК 621.98
ББК 34.54+34.62
Г 555

Автор: **Глущенко Владимир Александрович**

Рецензенты: Боровой С.С.
Смирнов Г.В.

Глущенко, В. А. Специальные виды штамповки. Ч. 2. Динамические методы деформирования [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. А. Глущенко; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (5,54 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

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.

Пособие широко иллюстрировано примерами изготавливаемых деталей.

Учебное пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 150700.62 «Машиностроение» очной формы обучения на 9 семестре.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр
1 ПРОЦЕССЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ИХ ПАРАМЕТРЫ	5
2 ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ	7
3 ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ	12
4 ВЗРЫВНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ	21
4.1 Определение, виды и характеристики взрывчатых веществ	21
4.2 Давления, развиваемые при взрыве	22
4.3 Технологические схемы взрывной обработки	24
4.4 Примеры использования энергии взрыва в промышленности	31
4.4.1 Листоштамповочное производство	31
4.4.2 Упрочнение взрывом	34
4.4.3 Взрывная резка металлов	35
4.4.4 Прессование порошков	37
4.4.5 Огневой способ зачистки заусенцев. Пример использования газообразных ВВ	39
4.4.6 Взрывное удаление обломков инструмента из деталей ответственных изделий	39
4.4.7 Сварка взрывом	40
5 ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ	44
5.1 Физические основы электрогидравлического эффекта	45
5.2 Технологические схемы электрогидроимпульсной обработки	47
5.3 Электродные системы для электрогидроимпульсной обработки	48
5.4 Конструктивно-технологические параметры эффективности электрогидравлического воздействия на обрабатываемый объект	51
5.5 Примеры технологического применения электрогидравлического эффекта	52
5.5.1 Листоштамповочное производство	52
5.5.2 Электрогидравлическая развальцовка труб	53
5.5.3 Упрочнение металла водно-воздушными струями	55
5.5.4 Электрогидравлическая очистка литья	57
5.5.5 Разрушение бетонных блоков	59
6 МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ (МИОМ)	61
6.1 Физика процесса	61
6.2 Повышение технологической пластичности металла при магнитно-импульсном нагружении	68

6.3 Технологические схемы МИОМ	72
6.4 Индукторные системы для магнитно-импульсной обработки	74
6.5 Примеры технологического применения импульсных магнитных полей в листовой штамповке	77
6.5.1 Разделительные операции для полых заготовок	77
6.5.2 Формообразующие магнитно-импульсные операции	84
6.5.3 Магнитно-импульсная калибровка	87
6.5.4 Магнитно-импульсная сборка	88
6.5.5 Реализация процессов МИОМ	93
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ	95
Расчет потребной энергии формообразования при динамических методах деформирования	
Контрольные задания	100
Контрольные вопросы	104
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	106

1 ПРОЦЕССЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Схемы. Параметры. Волновые эффекты.
Динамические свойства металлов.

Температурно-скоростные режимы деформирования подразделяют специальные виды листовой штамповки на статические и динамические. Рассмотренные ранее процессы штамповки эластичными средами относятся к статическим.

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 рисунке 1.

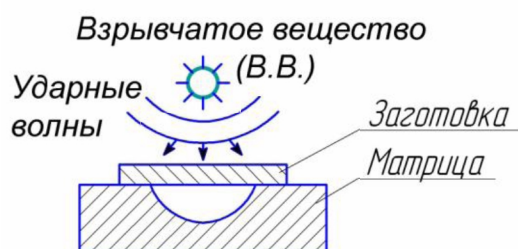


Рисунок 1 – Схема взрывного воздействия на деформируемую заготовку

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 (рисунок 2).

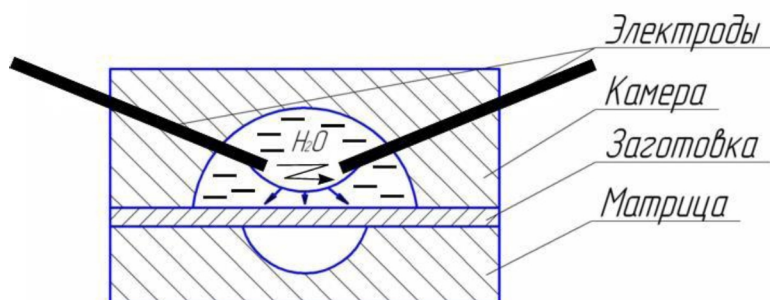


Рисунок 2 – Схема электрогидравлического эффекта

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

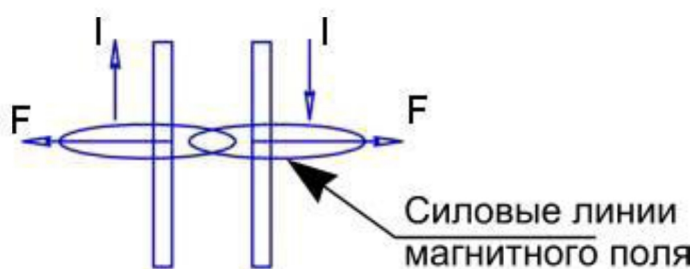


Рисунок 3 – Электродинамические усилия F , возникающие между двумя проводниками с током I

Взаимодействие магнитных полей порождает электромагнитные силы отталкивания, деформирующие металл. Источником магнитного поля является индуктор - катушка, на которую разряжается батарея конденсаторов (рисунок 4).

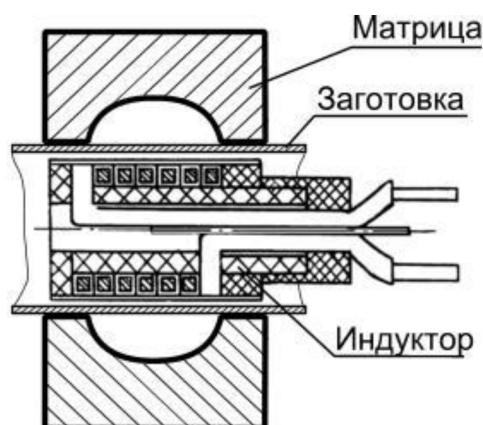


Рисунок 4 – Схема магнитно-импульсной обработки

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

В таблице 1 приведены сопоставительные значения этих параметров при статических и динамических видах листовой штамповки.

Таблица 1 – Значения параметров деформирования

Вид нагружения	Параметры деформирования		
	Время деформирования, τ , сек	Скорость деформирования, V м/сек	Скорость деформации, $\dot{\epsilon}$, 1/сек
статическое	До 0,5 – 1,0	До 1,0 – 3,0	10^{-6} - 10^{-3}
динамическое	10^{-3} - 10^{-5}	30 - 250	10^3 - 10^6

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

2 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.

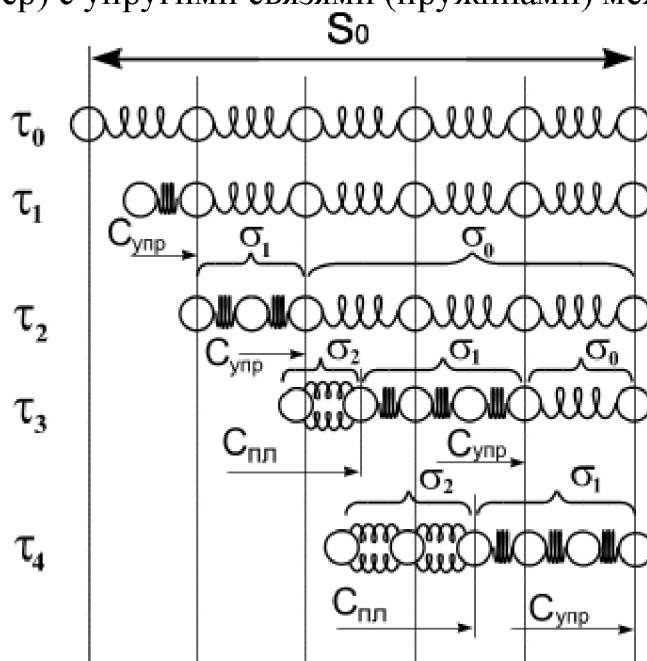


Рисунок 5 - Схема распространения упругих и пластических волн напряжений и деформаций в материале заготовки при динамическом нагружении
 S_0 – толщина заготовки.

В начальный момент времени τ_0 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_0 . 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/сек.

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 (τ_3), 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.

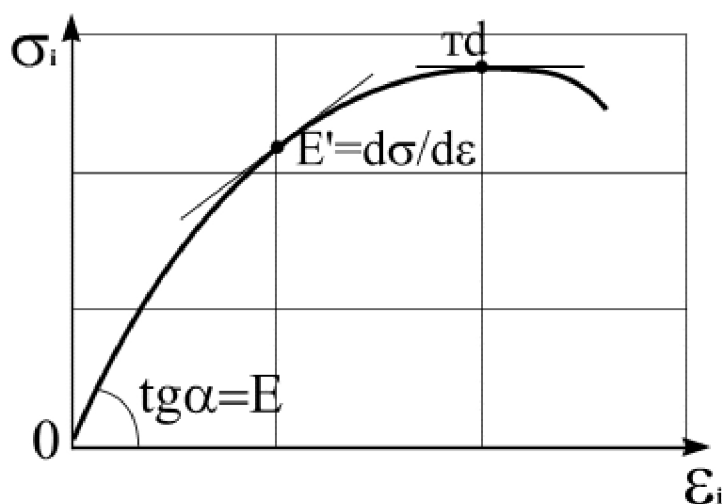


Рисунок 6 – Кривая упрочнения $\sigma_i(\varepsilon_i)$; переменный модуль упругости: $E' < E$; в т. d – $E' = 0$

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_0 , 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 (рисунок 7).

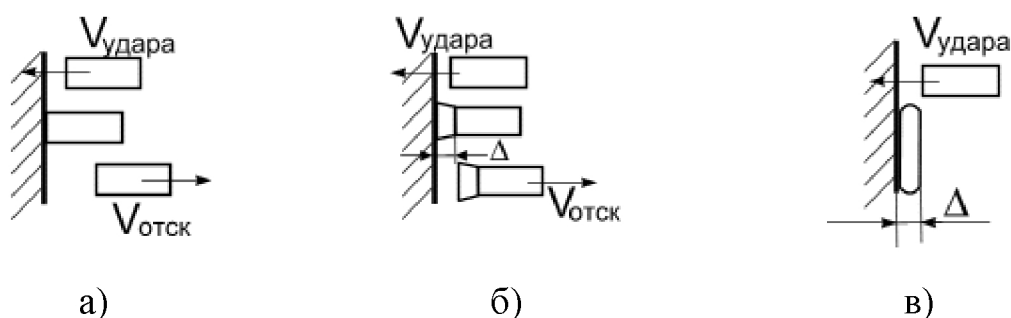


Рисунок 7 – Возможные схемы соударения заготовки с преградой (матрицей)

а) упругое соударение; б) упруго-пластическое соударение;

в) пластическое соударение

Δ – глубина распространения пластической волны.

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

Этим можно, например, объяснить 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 рисунке 8,а с максимальным прогибом в центре.

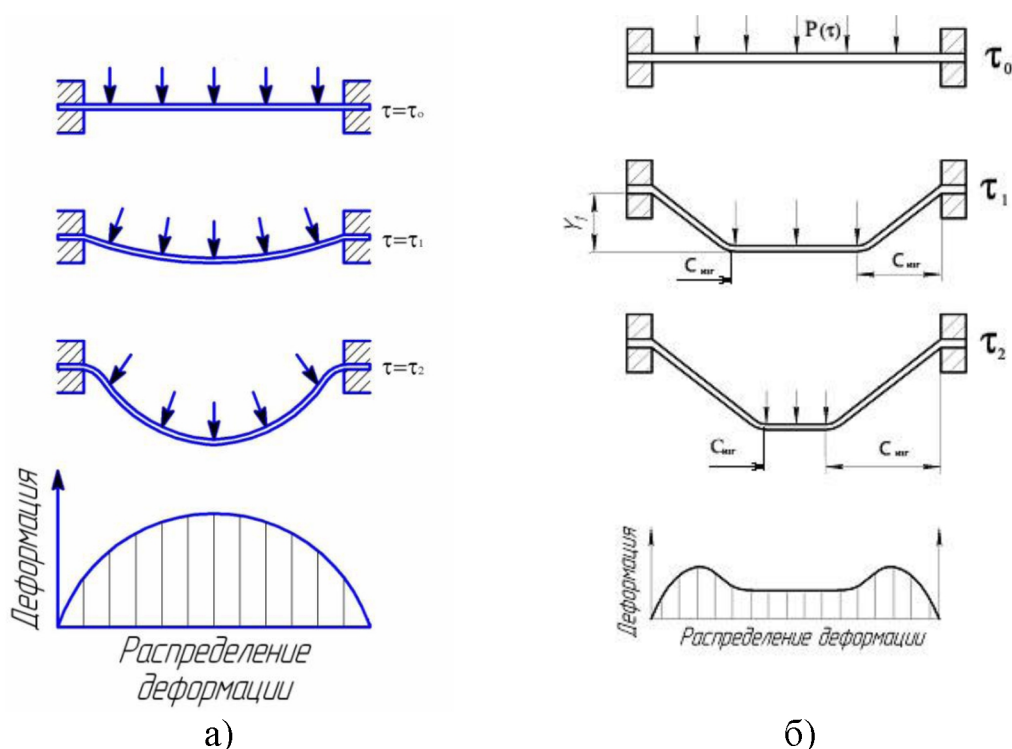


Рисунок 8 – Деформирование закрепленной по краям полосы под действием:

а) статической и б) динамической нагрузок

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 (рисунок 8,б).

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

Так, например, при штамповке трубчатой детали возник брак деталей. По неизвестным причинам после взаимодействия с матрицей раздаваемая (рисунок 9) заготовка в локальной зоне получила значительные пластические деформации обратного знака (рисунок 10).

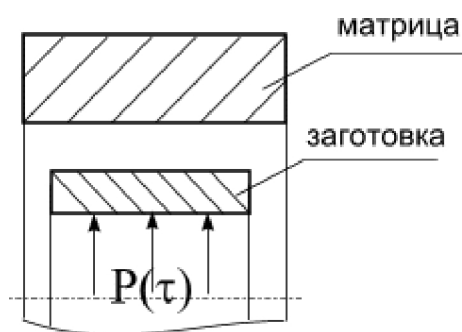


Рисунок 9 - Схема штамповки трубчатой заготовки «на раздачу»

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 (рисунок 11). От точки соударения влево и вправо по заготовке начали распространяться изгибные волны.

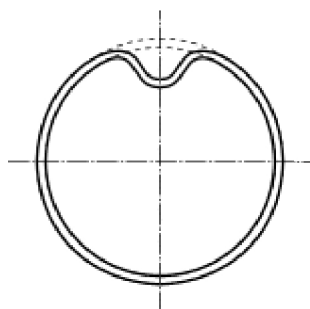


Рисунок 10 - Вид брака отштампованной детали

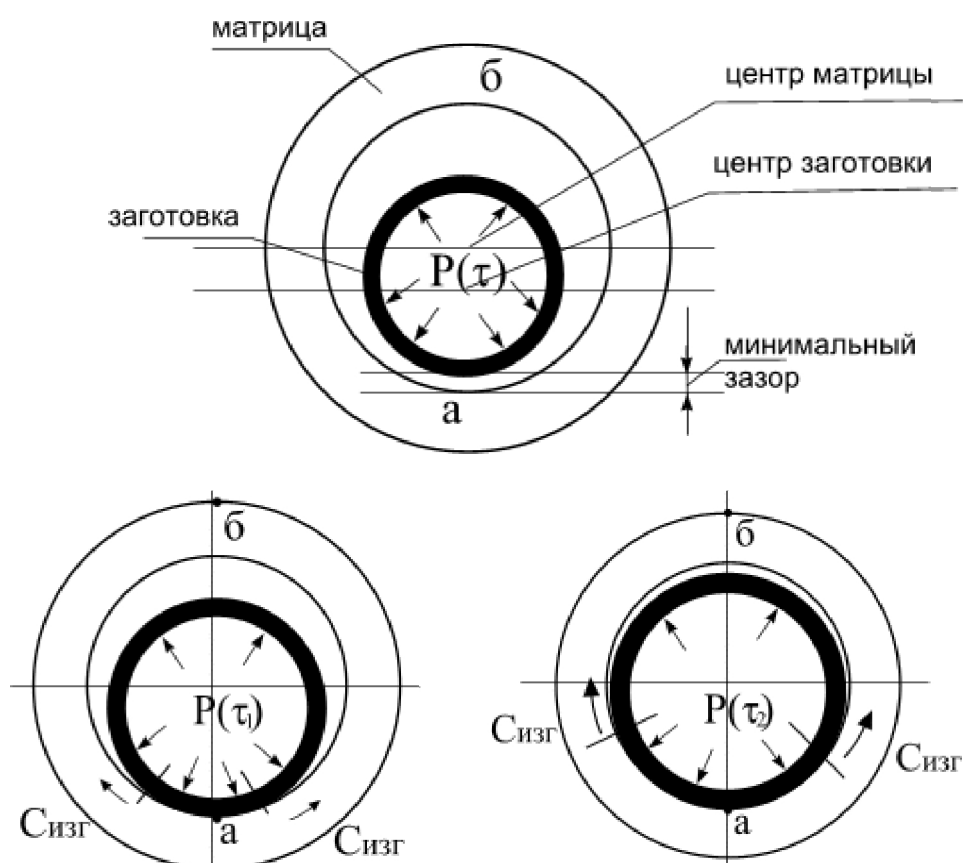


Рисунок 11 - Схема деформирования заготовки при несоосном ее расположении относительно матрицы

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 напряжения изгибных волн она приобрела обратную пластическую деформацию. Восстановив исходное центрирование заготовки относительно матрицы, было достигнуто высокое качество готовой детали.

3 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 $\dot{\epsilon} = 10^1 - 10^3$ 1/сек. В этих методах можно принять напряженное состояние однородным. При более высоких скоростях деформаций появляется необходимость учета волновых эффектов.

Поэтому при больших скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 10^4 - 10^5$ 1/сек 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

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

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

Для инженерных расчетов, при определении динамических констант механических свойств металлов, С.И.Губкин рекомендовал использовать [13] коэффициент динамичности:

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

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

Если значения коэффициентов динамичности больше единицы ($K > 1$), 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.

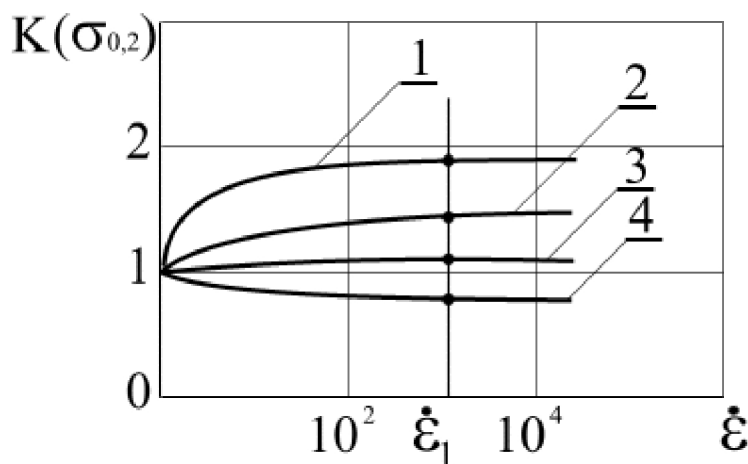


Рисунок 12 - Зависимость коэффициента динамичности $K(\sigma_{0,2})$ от $\dot{\epsilon}$ для различных марок материала
1 – Сталь 3; 2 – Сталь 45; 3 – X18H10T; 4 – ШХ15

На рисунке 12 в качестве примера приведены экспериментальные кривые изменения $K(\sigma_{0,2})$ от $\dot{\epsilon}$ 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 1,7 – 1,3 раза, другие (X18H10T) – 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/сек, а далее это изменение незначительно, что позволяет принимать в технологических расчетах значения $K(\sigma_{0,2})$ при $\dot{\epsilon} > 10^2$ 1/сек постоянными.

Если приведенный на рисунке 12 график перестроить в координатах $K(\sigma_{0,2}) = f(\sigma_{0,2}^{\text{стат}})$ при каком-либо фиксированном значении $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_1$, то можно выявить некоторую тенденцию в поведении материалов при динамическом нагружении.

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.

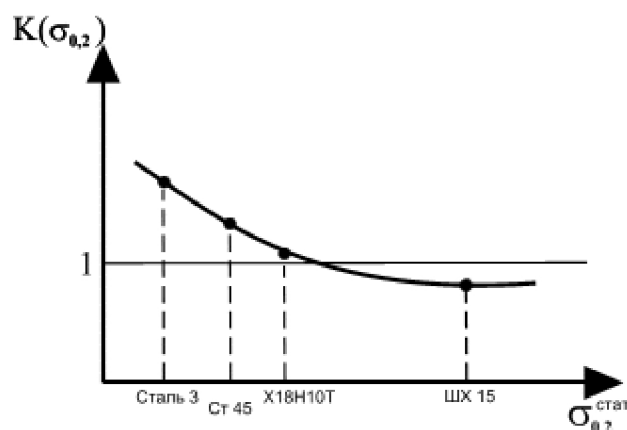


Рисунок 13 - Зависимость $K(\sigma_{0,2}) = f(\sigma_{0,2}^{\text{стат}})$ при фиксированном значении $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1$

Значения коэффициентов динамичности для ряда материалов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты динамичности ряда материалов

Коэффициент динамичности	Марки материалов					
	МО	АД1	Д16М	АМг6М	08кп	X18H10T
$K(\sigma_B)$	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,1
$K(\sigma_{0,2})$	1,4	1,4	1,3	1,4	1,3	1,3
$K(\delta)$	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 двойниковая 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 $\sigma_{\text{в}}^{\text{стат}}$ и $\sigma_{\text{в}}^{\text{дин}}$ сокращается.

Изменение пластичности металлов можно объяснить следующими причинами:

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

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 рисунке 14, видно, что повышение температуры обуславливает прирост ($\Delta \delta_1$) пластичности металла.

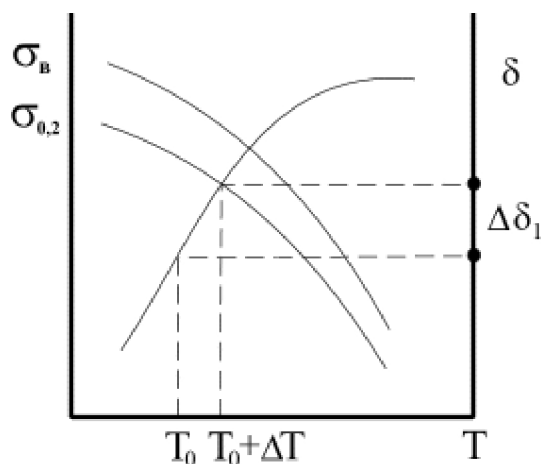


Рисунок 14 – Диаграмма пластичности металлов

2. При динамическом деформировании происходит изменение схемы напряженного состояния, например, при раздаче кольца: от одноосного растяжения к плоской схеме с дополнительным сжимающим напряжением (рисунок 15), возникшем в результате действия инерционных сил $F=ma$, имеющих противоположное направление действию активных сил.

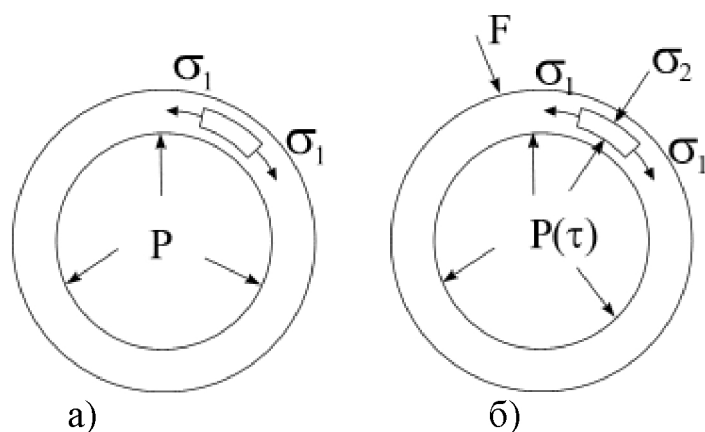


Рисунок 15 – Изменение схемы напряженного состояния при раздаче кольца под действием статической (а) и динамической (б) нагрузок

Большие значения скоростей деформирования $V = 30 \div 200$ м/сек и малое время деформирования $\tau = 10^{-3} \div 10^{-5}$ сек, обуславливают $[dv/d\tau = a]$ значительные инерционные силы. Повышение доли сжимающих напряжений приводит к увеличению пластических свойств ($\Delta\delta_2$) (рисунок 16).

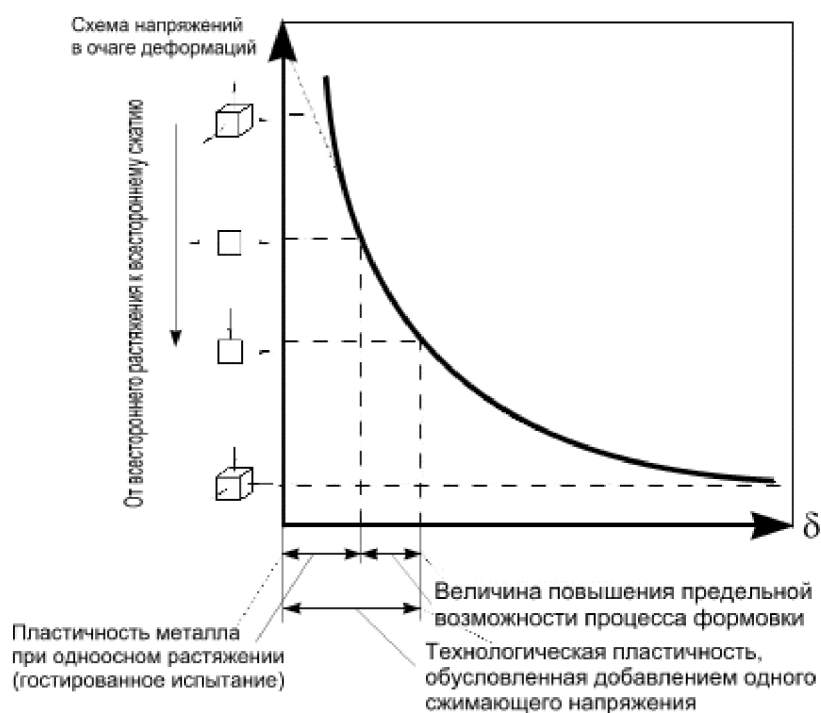


Рисунок 16 – Технологическая пластичность металла в зависимости от вида напряженного состояния (от всестороннего растяжения к всестороннему сжатию)

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 (рисунок 17).

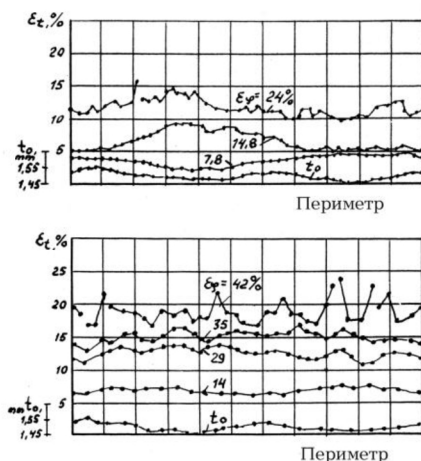


Рисунок 17 - Распределение деформаций по периметру заготовки при статическом (вверху) и динамическом (внизу) нагружении

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.

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

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

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 лишнем раза превышающее ее значение при статическом деформировании.

Увеличение значений констант $\sigma_{0,2}^{\text{дин}}$ и $\sigma_B^{\text{дин}}$ 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, требуемое 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 требуемой энергии деформирования; ее значения будут существенно занижены, что приведет к недоштамповке детали.

Кривые динамического упрочнения с учетом изложенного выше изменения $\sigma_{0,2}^{\text{дин}}$ и $\sigma_{\text{в}}^{\text{дин}}$ и $\delta^{\text{дин}}$ всеми своими точками лежат выше статических. (Рисунок 18).

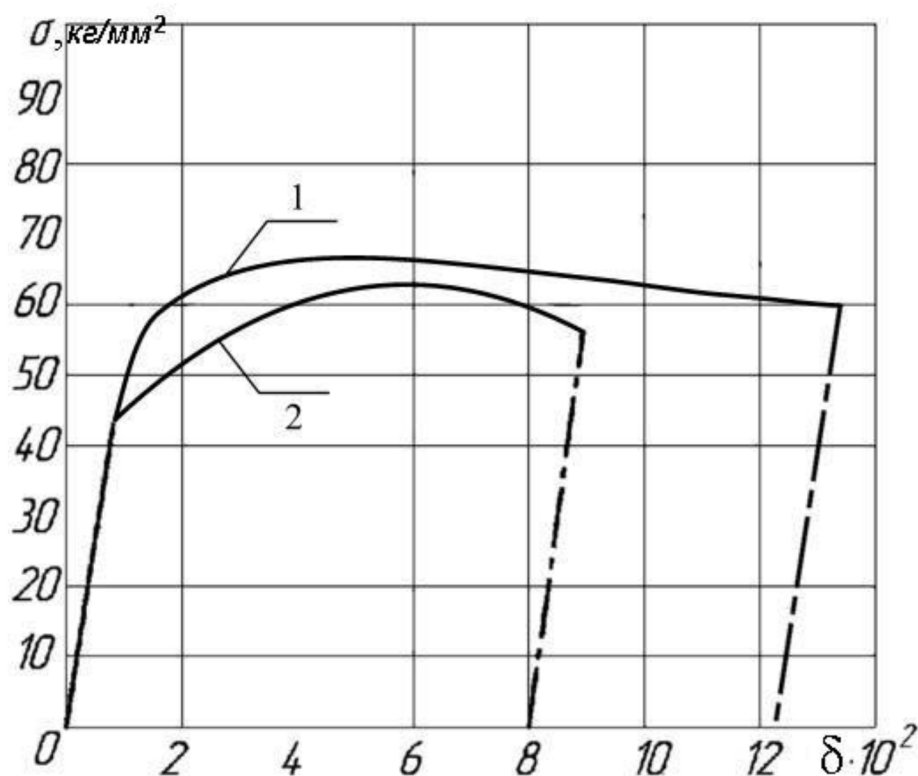


Рисунок 18 – Диаграмма напряжение-деформация для высокопрочного алюминиевого сплава при растяжении
1 – динамическое; 2- статическое нагружения

Динамические кривые упрочнения также можно аппроксимировать степенной функцией $\sigma_1 = K \epsilon_1^n$, но, естественно, коэффициенты степенной аппроксимации «K» и «n» будут другими, рассчитанными по значениям динамических свойств (таблица 3).

Таблица 3 – Динамические свойства материалов

Марка материала	$\rho \cdot 10^3$ г.сек ² /см ⁴	$E \cdot 10^{-3}$ кГ/мм ²	Механические свойства			Константы упрочнения	
			σ_B^B , кГ/мм ²	$\sigma_{0,2}^D$, кГ/мм ²	δ^D , %	K^D	n^D
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
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

ВЫВОДЫ

1. 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.
2. Особенностью динамического деформирования является возможность возникновения волновых эффектов в деформируемом металле.
3. Волновые эффекты объясняют некоторые особенности динамического деформирования: характерные конечные формы деталей, их точность, распределение деформаций и др.
4. При расчете параметров динамического деформирования необходимо учитывать изменение механических свойств металла от скорости деформации.
5. С увеличением скорости деформации, численные значения констант механических свойств, для большинства деформируемых металлов возрастают.

4 ВЗРЫВНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Определение. Взрывчатые вещества.
Характеристики ВВ. Развиваемые давления.
Технологические схемы. Примеры использования

4.1 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...).

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, нитрат 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.

4.2 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 $(5-8) \cdot 10^3$ м/сек.

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 схеме взрыва в воде.

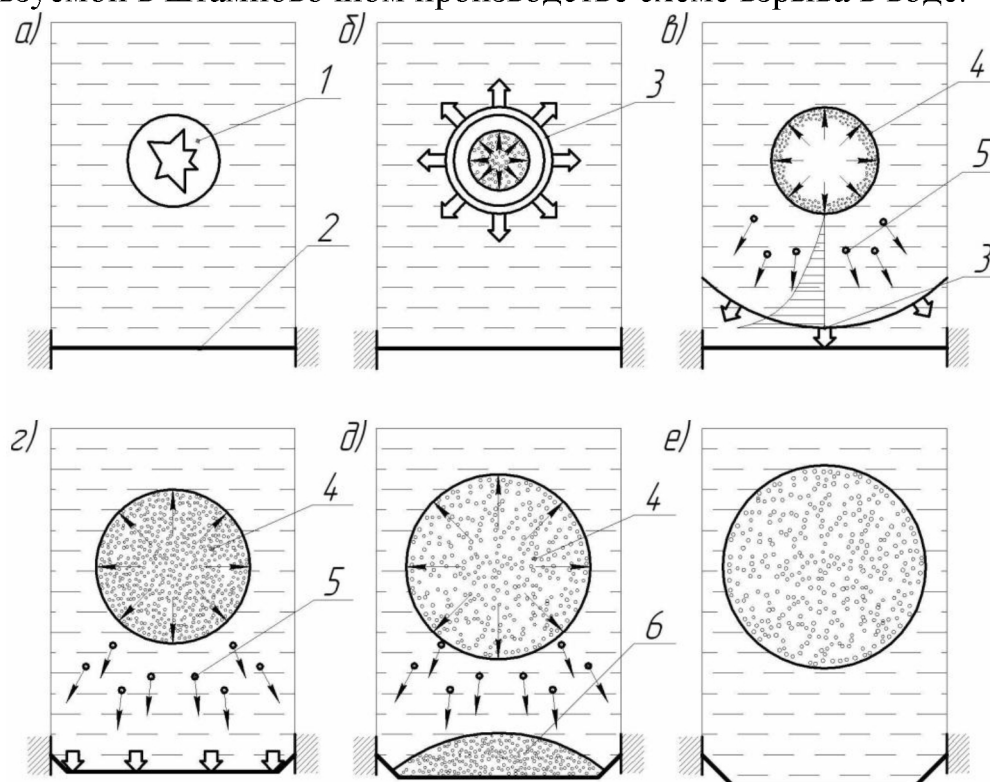


Рисунок 19 – Схема образования импульсных давлений и передача их заготовке при взрыве

1 – сферический заряд ВВ; 2 – деформируемая заготовка;
3 – ударная волна; 4 – парогазовый пузырь; 5 – поток жидкости; 6 – зона кавитации.

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).

Заготовка, восприняв энергию ударной волны, деформируется, отрываясь от воды. Между фронтом отраженной волны и поверхностью заготовки возникает зона кавитации, которая характеризуется наличием в воде большого количества пузырьков и пустот (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).

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

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

где P_0 и T_0 начальное (исходное) давление и температура газовой смеси.

T – температура продуктов взрыва.

Если принять $P_0 = 1$ атм, $T_0 = 293^0\text{K}$, а $T = (3000 \div 4000)^0\text{K}$, 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.

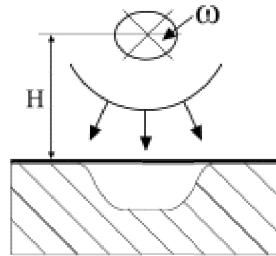


Рисунок 20 – Расчетная схема давления взрыва на заготовку

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 течении которого давление падает в e раз.

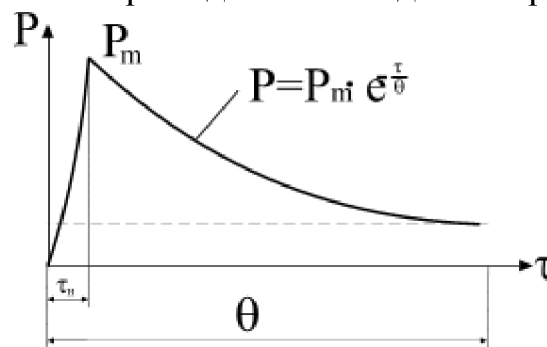


Рисунок 21 – Изменение давления взрыва на заготовку во времени

Используемые на практике давления составляют $(1 \div 5) \cdot 10^5$ н/м².

4.3 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 (рисунок 22). 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 $3 \div 5$ 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.

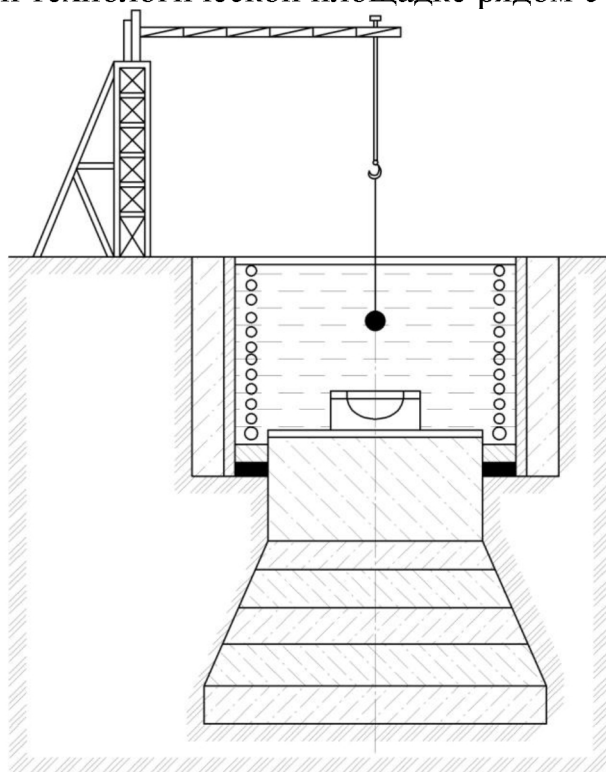


Рисунок 22 – Бассейновая технологическая
схема взрывной штамповки

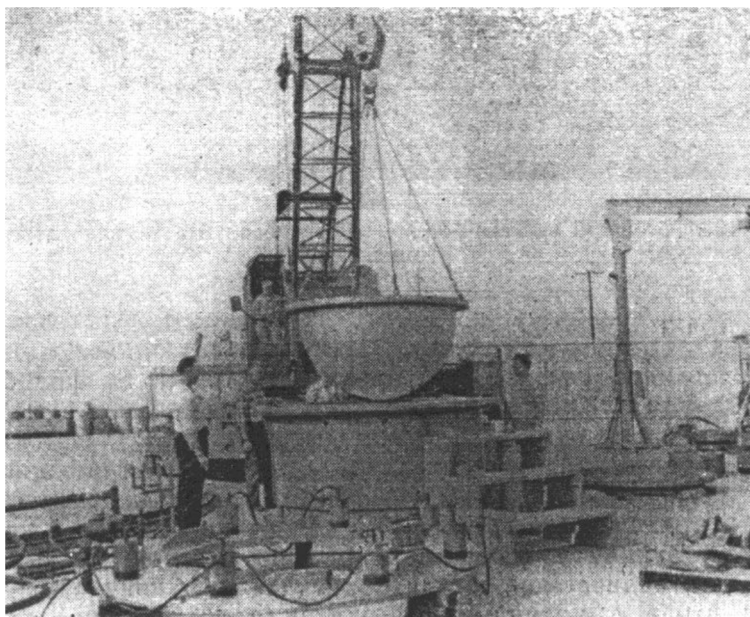


Рисунок 23 – Технологическая площадка.
Извлечение отштампованной полусферы из матрицы

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.

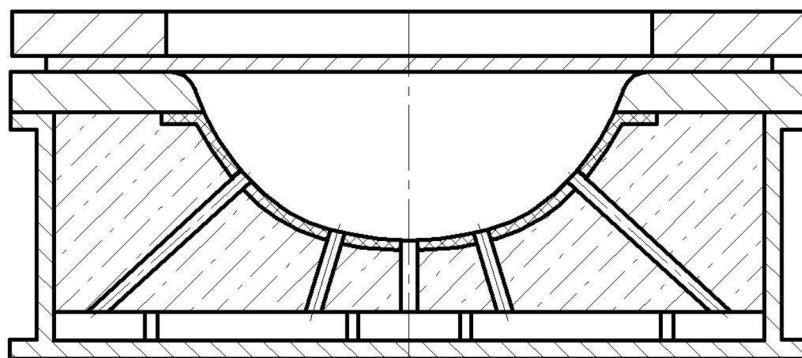


Рисунок 24 – Бетонная матрица для штамповки взрывом с каналами для вакуумирования пространства под заготовкой

Повышенные сейсмические и звуковые волны вынуждают использование 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.

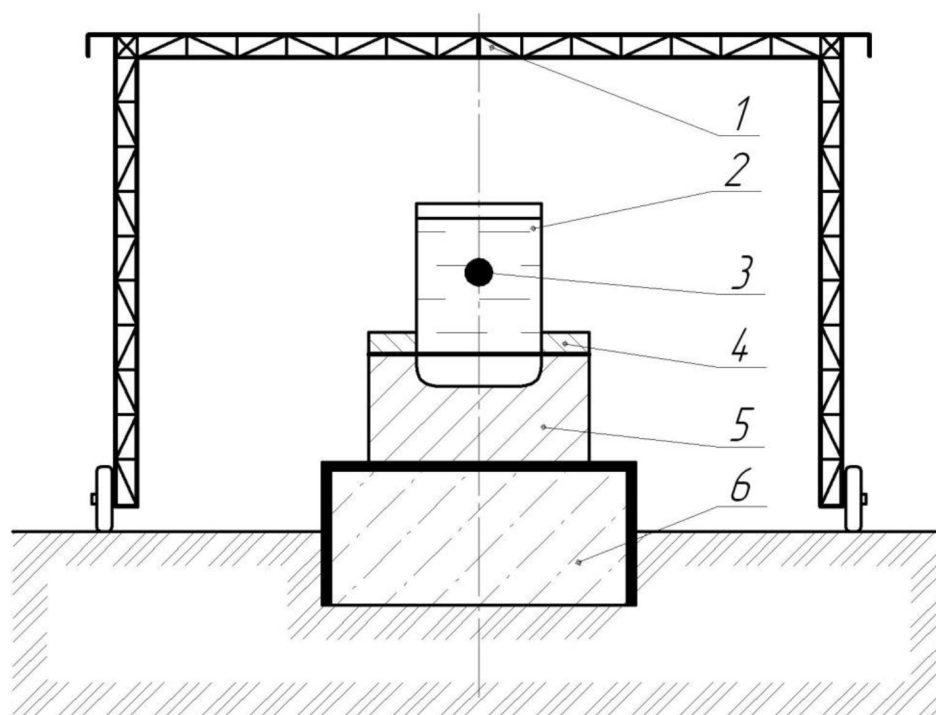


Рисунок 25 – Технологическая схема взрывной штамповки в бронекамере

1 – рама, обшитая стальным листом; 2 – разовый бассейн;
3 – заряд ВВ; 4 – заготовка; 5 – штамповая оснастка; 6 – шабот.

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 (рисунок 26).

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

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

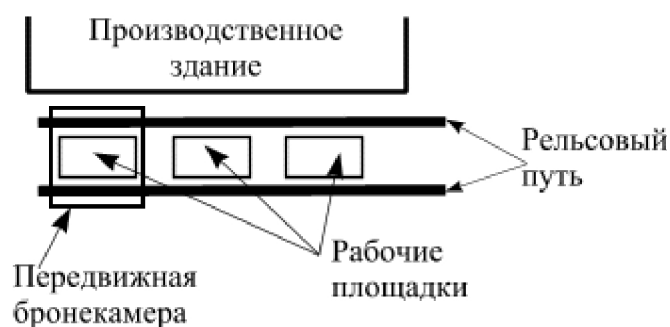


Рисунок 26 – Схема производственного участка с бронекамерой

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 применяемые в закрытых производственных помещениях (рисунок 27).

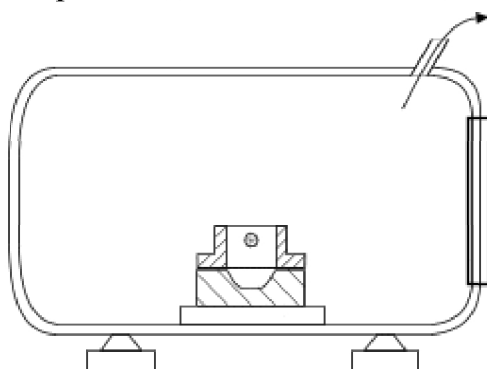


Рисунок 27 – Технологическая схема взрывной штамповки в вакуумной камере

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 грамм ВВ выделяет около 1 л. газа). Камера вакуумируется до давления не более $0,1 \cdot 10^5$ Па. Технологическое оснащение такое же, как и используемое в бронекамерах.

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, пресса, пресс-пушки.

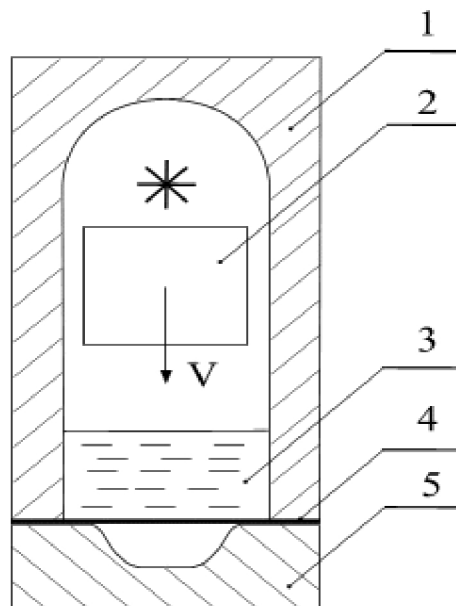


Рисунок 28 – Схема пресс-пушки, разработанной специалистами Харьковского авиационного института:
1 – ствол; 2 – боек; 3 – жидкость; 4 – заготовка; 5 - матрица

Основным элементом пресс-пушки (рисунок 28) 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).

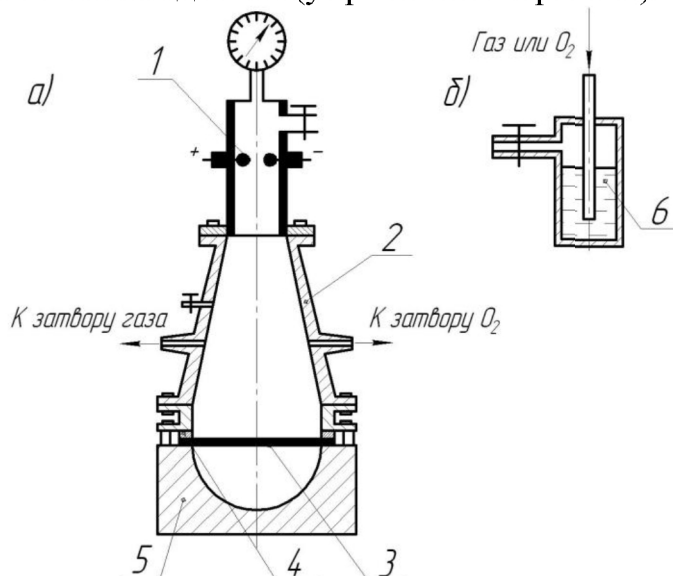


Рисунок 29 – Установка для штамповки взрывом газообразных ВВ:
1 – разрядник; 2 – взрывная камера; 3 – заготовка; 4 – прижим;
5 – матрица; 6 - смесь

На рисунке 29 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 (рисунок 30).

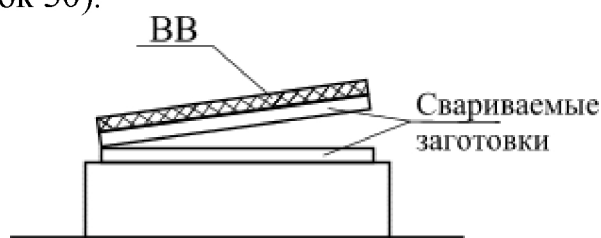


Рисунок 30 – Схема сварки листов взрывом

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/сек. При импульсном взаимодействии двух тел образуется сварное соединения. Аналогичная схема используется при поверхностном упрочнении деталей ударными волнами.

4.4 Примеры использования энергии взрыва в промышленности.

4.4.1 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 стали.

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 с максимальным диаметром два метра, глубиной 0,5 метра при толщине материала 5 мм из высокопрочного алюминиевого сплава, имеет отклонение от заданного по всему контуру $\pm 0,2$ мм.

На рисунках 31-34 приведены фотографии некоторых деталей, полученных штамповкой взрывом.

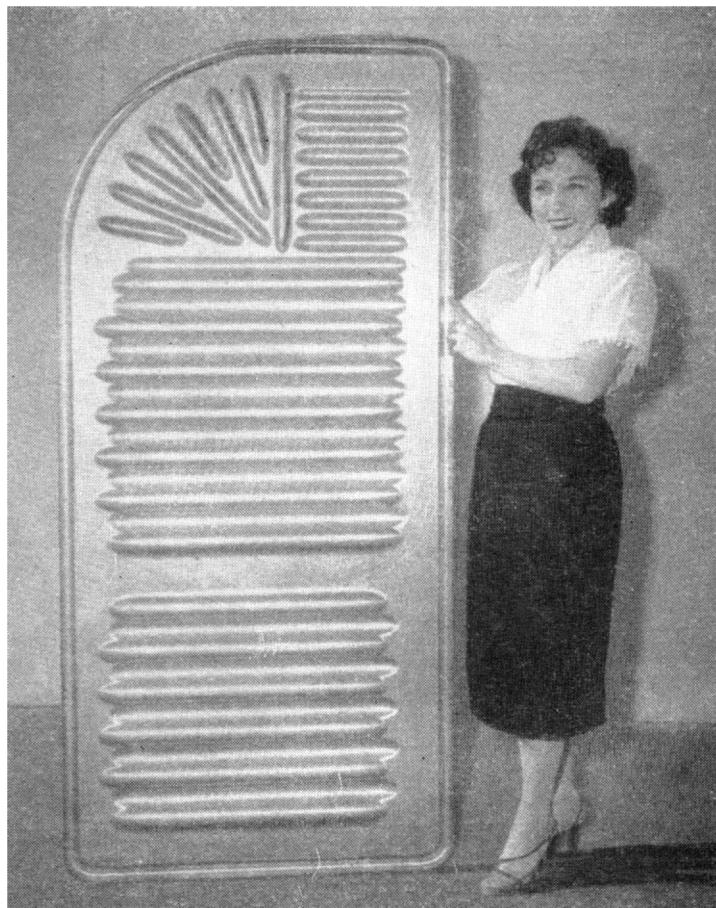


Рисунок 31 - Гофрированная панель реактивного самолета



Рисунок 32 – Днище железнодорожной цистерны

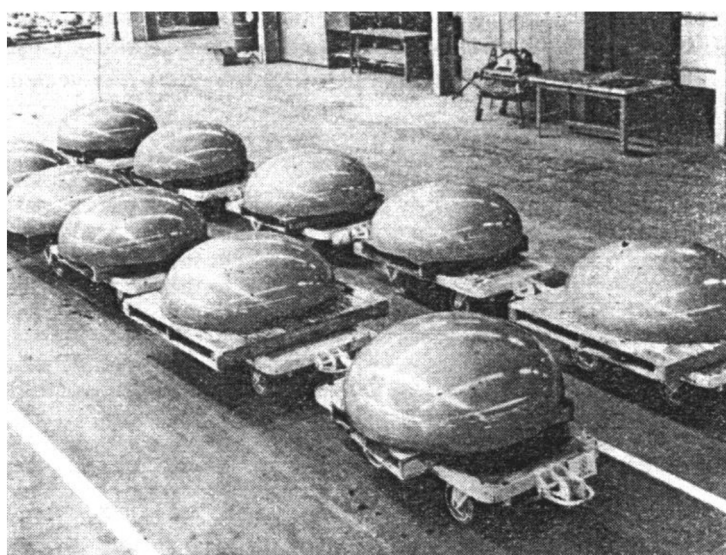


Рисунок 33 – Днища топливных ракетных баков

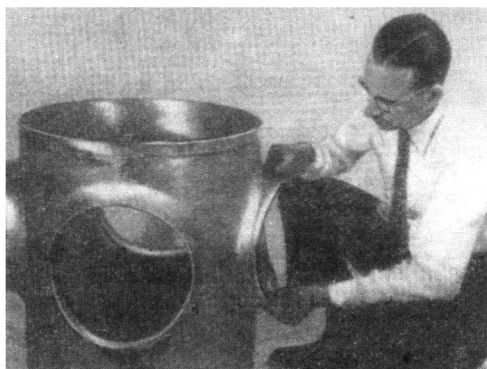


Рисунок 34 – Цилиндр с патрубками, отбортованными взрывом

Себестоимость приведенных на фотографиях деталей почти в 40 раз дешевле, их изготовления на прессах, а срок подготовки производства занимает в 10-15 раз меньше времени, чем при обычных прессовых вариантах.

4.4.2 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, подвергающиеся в процессе эксплуатации ударам, нарастающему износу.

В таблице 4 приведены результаты взрывного упрочнения марганцевой стали.

Таблица 4 - 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
σ_B , кГ/мм ²	94	128

Упрочнение распространяется на некоторую глубину, что можно проиллюстрировать графиком (рисунок 35).

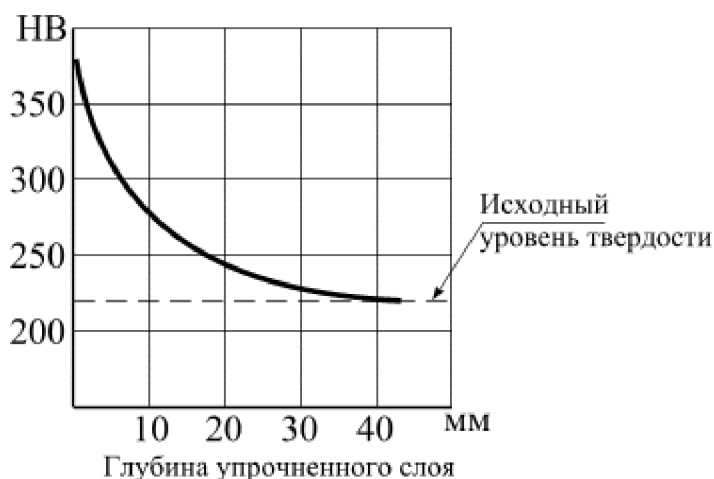


Рисунок 35 – Распределение твердости по глубине упрочненной взрывом пластины из марганцевой стали

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

4.4.3 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 (рисунок 36) осуществляется встречным ударом ножей, разгоняемых энергией взрыва. При этом, возникающие трещины распространяются навстречу друг другу до полного разделения металла.

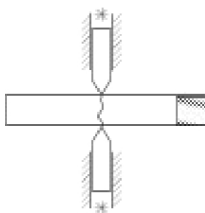


Рисунок 36 – Схема взрывной резки проката ножами

Такая технология используется для резки проката, например, квадратного сечения со сторонами 200х200 мм. И хотя качество разделения ос-

тавляет желать лучшего, однако высокая производительность расширяет металлургам «узкое» место, при производстве и отгрузке проката из-за существовавшего ранее несоответствия производительности прокатки и резки.

При резке контактным зарядом (рисунок 37) режущее действие сводится к сдвигу, который возникает под действием высокого давления на поверхности раздела между металлом и ВВ.

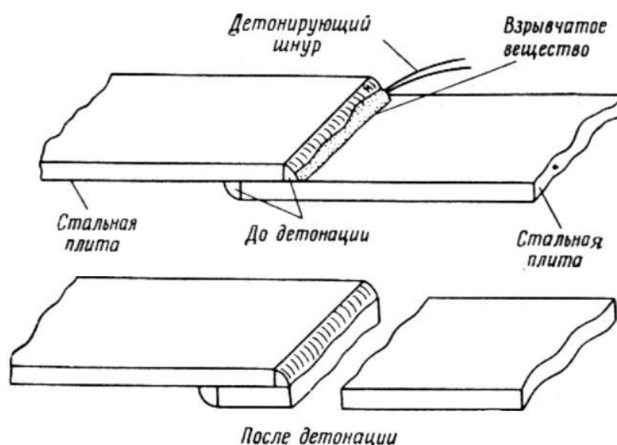


Рисунок 37 – Резка сварной плиты контактным зарядом

При резке профилированным зарядом (рисунок 38) используется ВВ с металлической облицовкой.

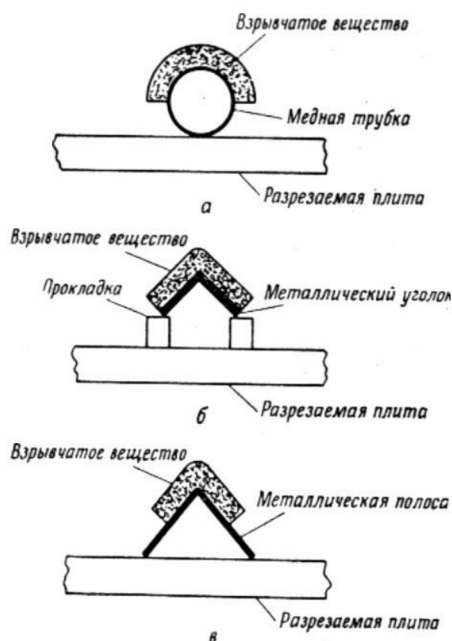


Рисунок 38 - Резка металла профилированным зарядом

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.

4.4.4 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 (рисунок 39) предусматривает прессование порошков в результате одно или двухстороннего воздействия на них твердых тел, подвергнутых взрывному нагружению (поршневые прессы).

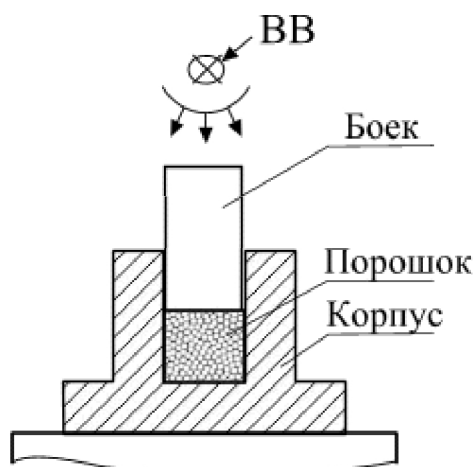


Рисунок 39 – Схема однопоршневого взрывного прессы

Для получения сверхвысоких давлений прессование порошков может осуществляться путем взрывного обжима трубы, в которую насыпан порошок (рисунок 40)

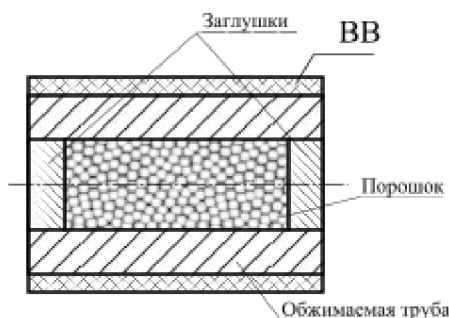


Рисунок 40 – Схема прессования порошков путем взрывного обжима трубы

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 (рисунок 41)

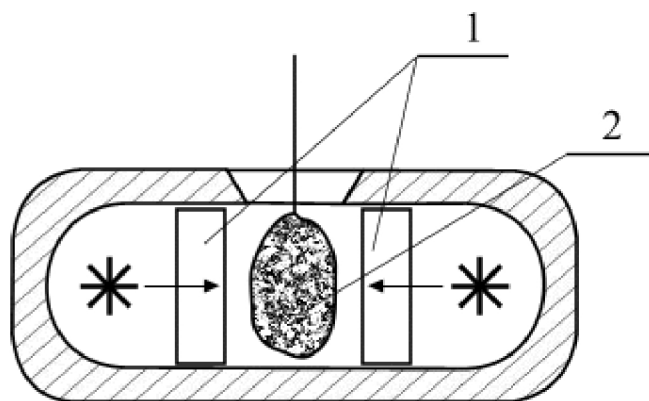


Рисунок 41 – Схема взрывного компактирования стружки:

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).

4.4.5 Огневой способ зачистки заусенцев. Пример использования газообразных ВВ

На подштамповой плите размещают детали с подлежащими удалению заусенцами (рисунок 42).

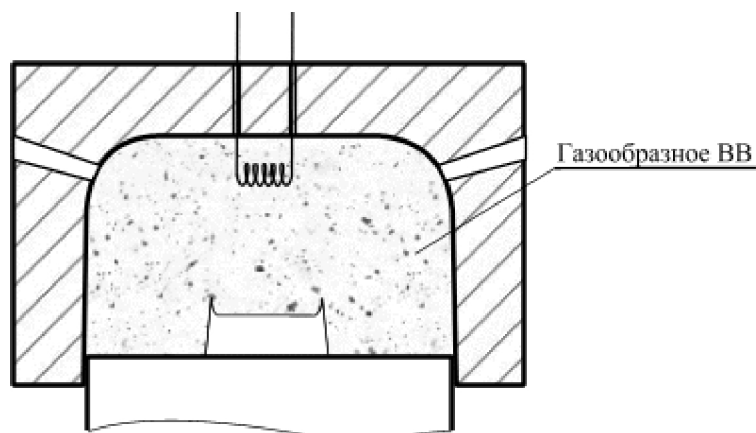


Рисунок 42 – Схема огневой зачистки заусенцев

В рабочей камере, заполненной газообразным ВВ, производят взрыв. Температура продуктов взрыва достигает 3000 – 4000⁰С. Под действием этой температуры тонкий заусенец мгновенно расплавляется, а газовый поток продуктов взрыва «сдувает» расплавленный металл с детали. Длительность процесса удаления заусенца составляет $10^{-4} \dots 10^{-3}$ сек. 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.

4.4.6 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 не простая технологическая задача.

Ученые МГУ предложили оригинальный способ удаления обломков сверл с помощью взрывных устройств (рисунок 43).

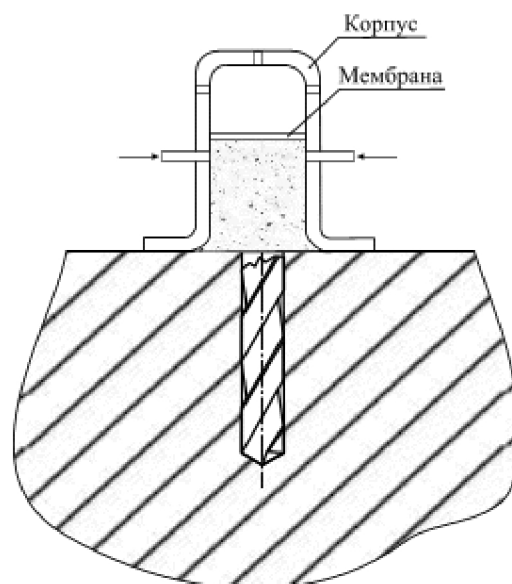


Рисунок 43 – Схема взрывного удаления обломков режущего инструмента

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).

4.4.7 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 ($\beta = 5 \dots 20^\circ$) друг к другу (рисунок 44).

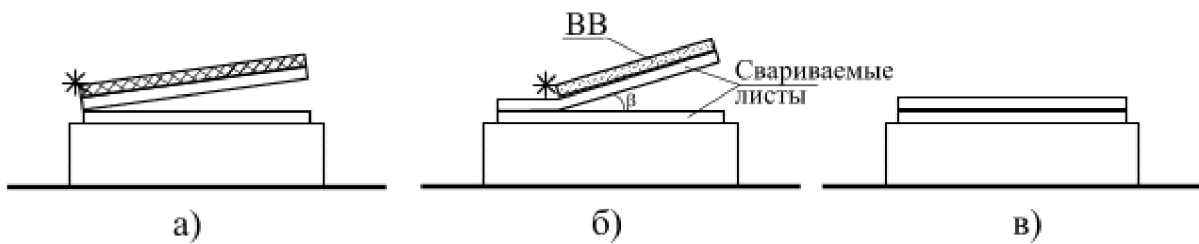


Рисунок 44 – Схема сварки листов взрывом

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 N_n и касательную N_τ (рисунок 45,а).

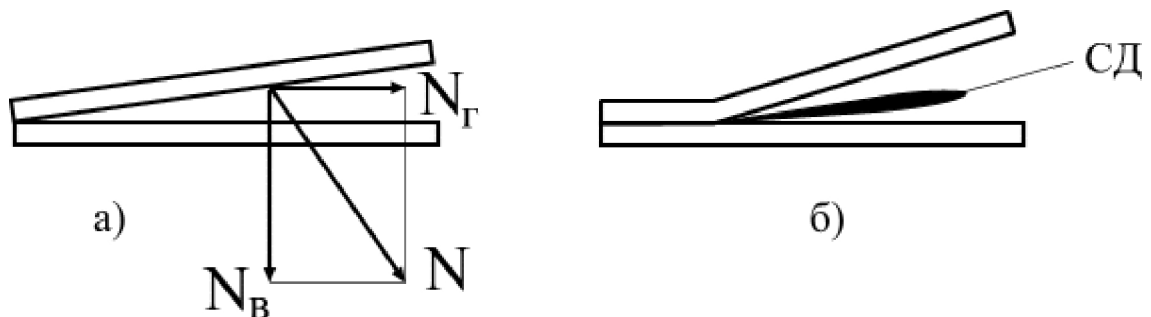


Рисунок 45 – Схема возникновения сдвиговых деформаций при сварке взрывом

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 (рисунок 45,б). Происходит самоочищение поверхностей. Одновременное действие нормального давления при этом вызывает сложное пластическое взаимодействие металла в зоне контакта и образование волн завихрений (рисунки 46,47).

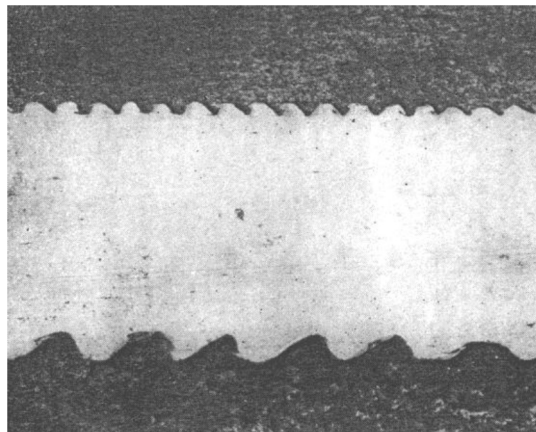


Рисунок 46 – Микрофотография поверхностей сварки латуни (сверху), меди (в середине) и стали (внизу)

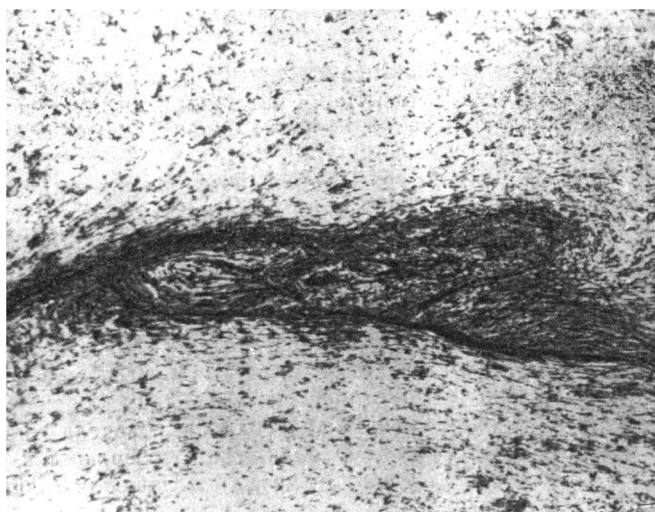


Рисунок 47 – Микрофотография, иллюстрирующая завихрение струи при сварке пластин

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 (рисунок 48).

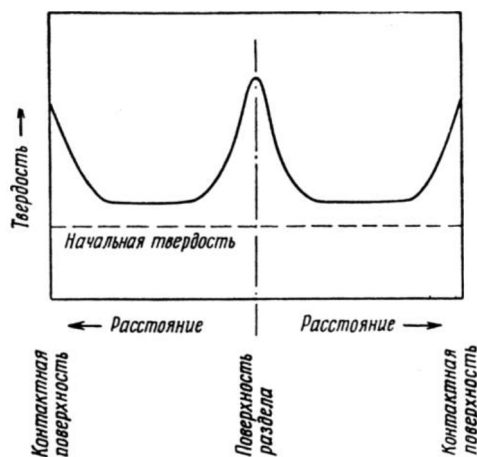


Рисунок 48 - Распределение твердости в пластинах, сваренных взрывом

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.

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 м².

Прочность сварного шва превышает прочность меди.

Имеется опыт сварки взрывом (сталь-медь) цилиндрических заготовок диаметром 400 мм и длиной 2 метра. 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.

ВЫВОДЫ

1. Взрыв – выделение большой энергии в ограниченном объеме за минимальный промежуток времени.
2. Взрывчатые вещества (ВВ) могут быть газообразными и твердыми (конденсированными). Твердые ВВ могут быть выполнены в виде шнуров, пластин, сфер.
3. Выбор вида ВВ определяется его главным свойством – энергосодержанием. Кроме того, учитываются такие его свойства, как бризантность, фугасность, физическая и химическая стойкость.
4. 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.
5. Разработано и используется несколько технологических схем взрывной обработки: бассейновая, бронекамерная, вакуумная, с использованием пресс-пушки, непосредственного воздействия на объект.
6. Преимущества взрывной обработки:
 - отсутствие оборудования;
 - высокие давления, расширяющие технологические возможности по габаритным размерам и свойствам обрабатываемых деталей;
 - высокая точность готовых деталей.
7. Основные направления использования энергии ВВ в технологических целях: штамповка, упрочнение, сварка, брикетирование порошков и стружки.

5 ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Физические основы. Технологические схемы. Разрядные камеры и электродные системы. Конструктивно-технологические параметры. Примеры технологического применения.

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 рисунке 49.

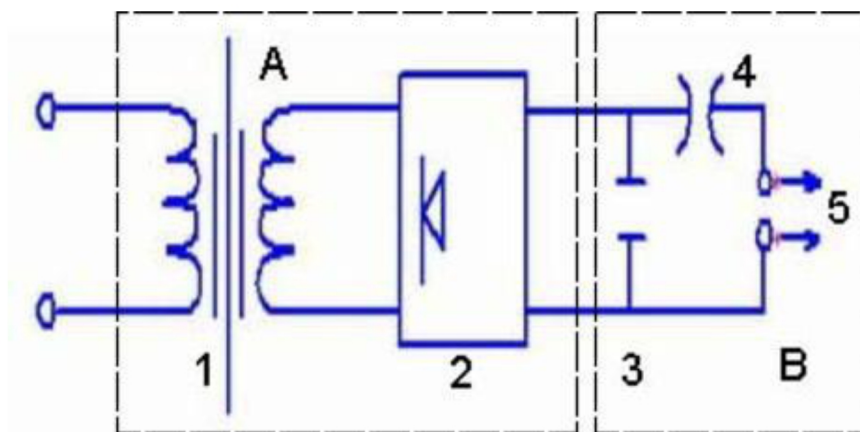


Рисунок 49 – Блок-схема генератора импульсных токов

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

$$W = CU^2/2, \text{ где}$$

С – 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 раз-

ряд батареи конденсаторов. Величина тока в разрядной цепи достигает сотен килоампер, время разряда – миллисекунды.

5.1 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 $\sim 0,1$ мм, температура в котором уже достигает несколько тысяч градусов.

Скорость движения стримеров зависит от напряженности электрического поля и электропроводности жидкости и составляет десятки км в сек.

В какой-то момент времени передовые стримеры, движущиеся навстречу друг другу, встретятся, замкнув таким образом цепь разряда батареи конденсаторов (рисунок 50).

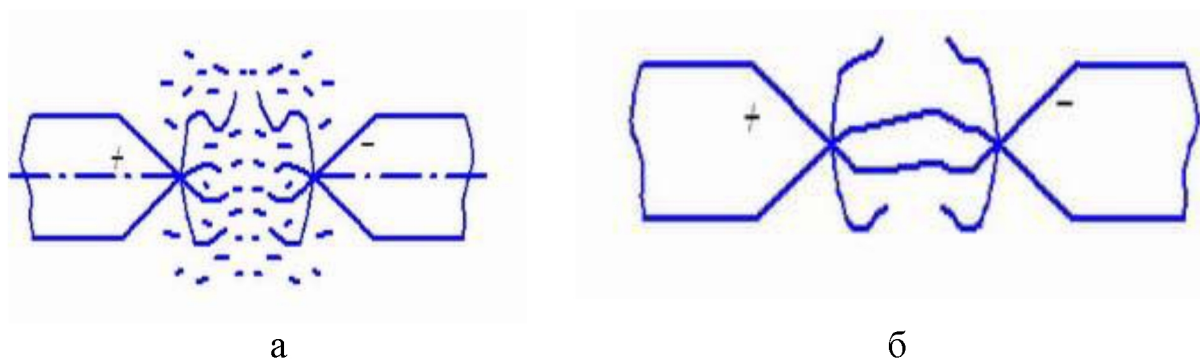


Рисунок 50 – Последовательность формирования канала разряда

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 – формирование (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 $1,5 \cdot 10^3$ МПа. Поэтому, уже через 0,1 – 0,3 мксек 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/сек.

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 (рисунки 51).

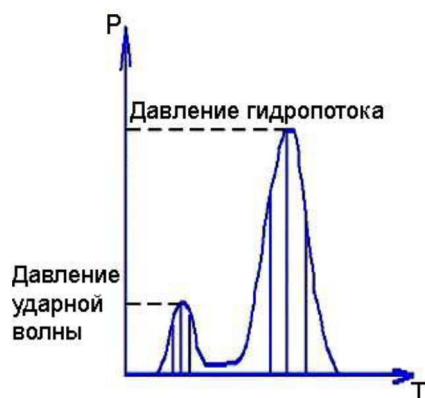


Рисунок 51 – Силовое давление, воспринимаемое заготовкой при электрогидравлическом нагружении

5.2. Технологические схемы электрогидроимпульсной обработки

Разработано несколько технологических схем электрогидроимпульсной обработки: схема непосредственного воздействия электрогидроэффекта на деформируемую заготовку в открытых и закрытых разрядных камерах (рисунок 52) и схема воздействия на заготовку через дополнительные промежуточные тела (резиновые диафрагма, твердые тела) (рисунок 53).

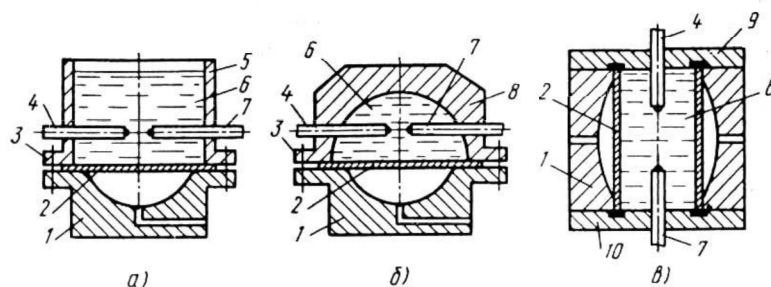


Рисунок 52 – Схемы электрогидравлической штамповки из плоской заготовки в открытой (а) и закрытой (б) камерах и из трубчатой заготовки в закрытой камере (в).
1-матрицы; 2 – заготовки; 3 – прижимы; 4,7 – электроды; 5,8 – открытая и закрытая камеры; 6 – вода; 9,10 – верхняя и нижняя крышки

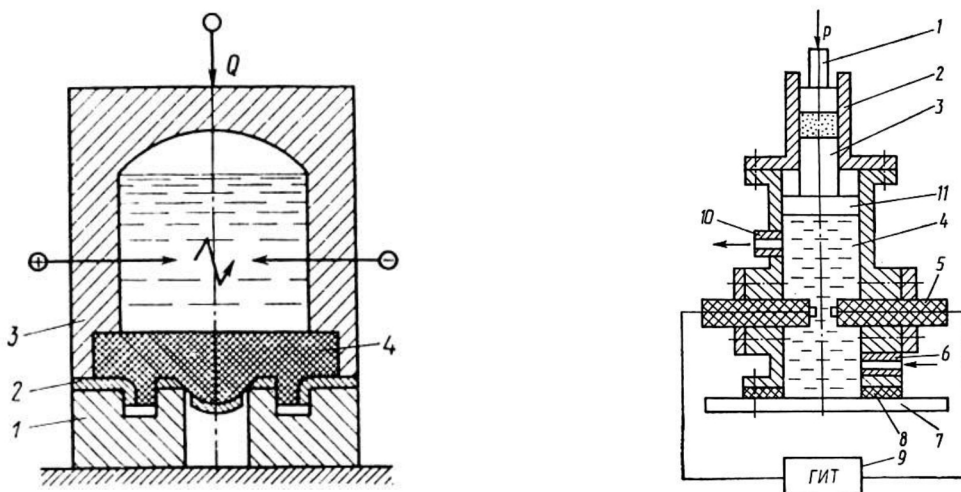


Рисунок 53 – Схемы электрогидравлического воздействия на объект через промежуточные тела:
а) эластичную диафрагму; б) поршень.

Закрытые камеры характеризуются сравнительно небольшим объемом жидкости, при этом наиболее полно используется эффект гидротока 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 минакамерах, используемых для развальцовки труб в трубные доски) или в различных поршневых конструкциях, используемых для прессования порошков, или для создания вибронагрузок.

5.3 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 (рисунок 54).

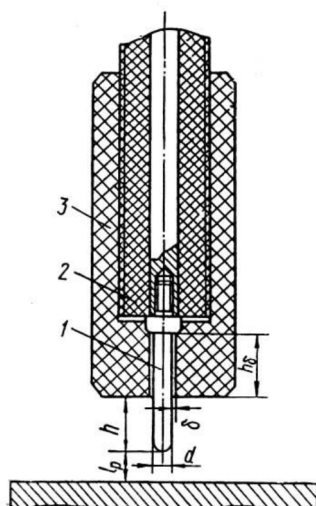


Рисунок 54 – Типовая конструкция электрода

1 – токопроводящий стержень; 2 – изоляция электрода;
3 – изолирующий сменный наконечник

Основными размерами при проектировании являются размеры d и h . Обычно $h = 30 \dots 100$ мм, $d = 4 \dots 10$ 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.

Электродные системы можно классифицировать по следующим признакам:

- конструктивному: стержневые, коаксиальные, сложной геометрии;
- по принципу возбуждения электрического разряда: свободного разряда и иницируемые;
- 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, разрушаемых 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 рисунке 55.

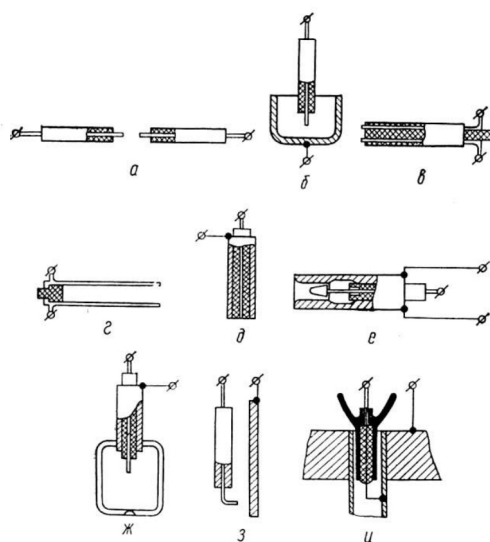


Рисунок 55 – Виды электродных систем

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 – коаксиальные с линейным разрядным промежутком; з – стержневые с угловым расположением и – «взрывающийся» патрон

Многообразие электродных систем позволяет осуществлять широкий круг технологических операций, управлять силовым воздействием (рисунок 56).

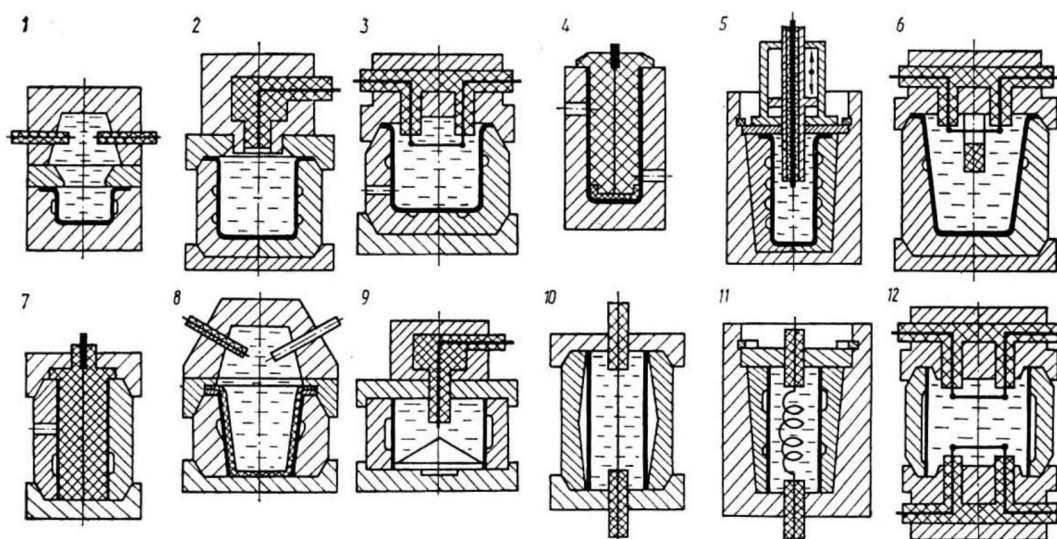


Рисунок 56 – Разрядные камеры и устройства для

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

5.4 Конструктивно-технологические параметры эффективности электрогидравлического воздействия на обрабатываемый объект

Давление на заготовку (деталь) в первую очередь определяется 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 l (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 к возможности пробоя на заготовку.

В связи с этим существуют оптимальные размеры l и h :

Например:

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

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_{opt} , но с другой стороны возрастает вероятность оплавления, эрозии материала электрода.

Оптимальное расстояние от канала разряда до заготовки должно быть не менее $h_{opt} = 2 l_{opt}$. 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.

5.5 Примеры технологического применения электрогидравлического эффекта

5.5.1 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 полые заготовки диаметром до 500 мм, высотой 800 мм с толщиной стенки до 25 мм из алюминиевых, медных, титановых сплавов и сталей.

На рисунке 57 в качестве примера показаны детали, изготовленные электрогидроимпульсной штамповкой.

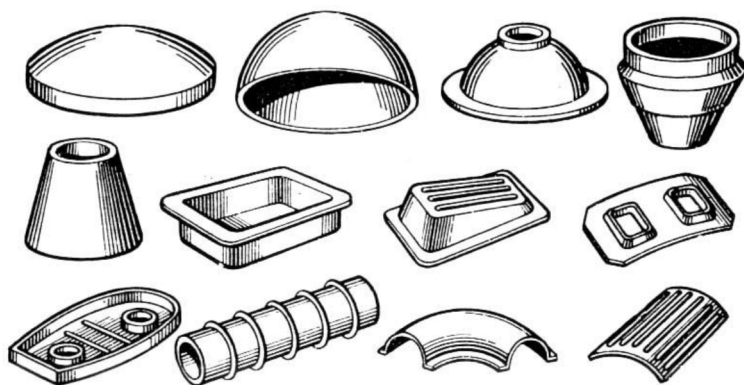


Рисунок 57 – Детали, изготовленные электрогидроштамповкой

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, гидротоков, 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 причиной оснащения целого ряда предприятий не только единицами такого оборудования, а даже создания как, например, на Казанском вертолетном заводе, целого участка (линии) из прессов ПЭГ.

5.5.2 Электрогидравлическая развальцовка труб

При изготовлении теплообменных аппаратов самой ответственной операцией является операция развальцовки (закрепления) концов труб в трубных решетках (рисунок 58).

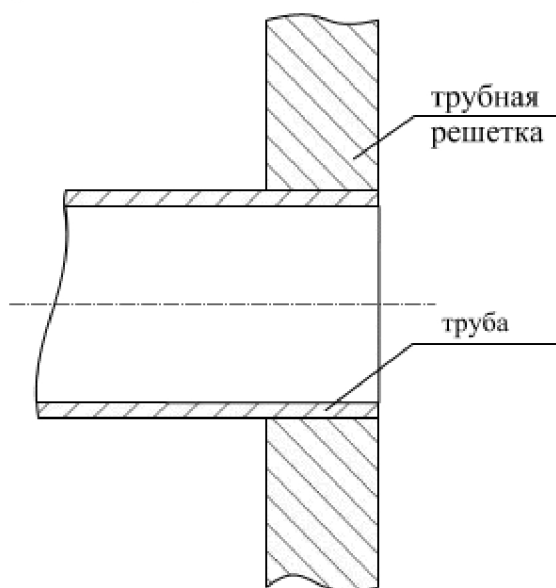


Рисунок 58 – Фрагмент теплообменного аппарата

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 рисунке 59.

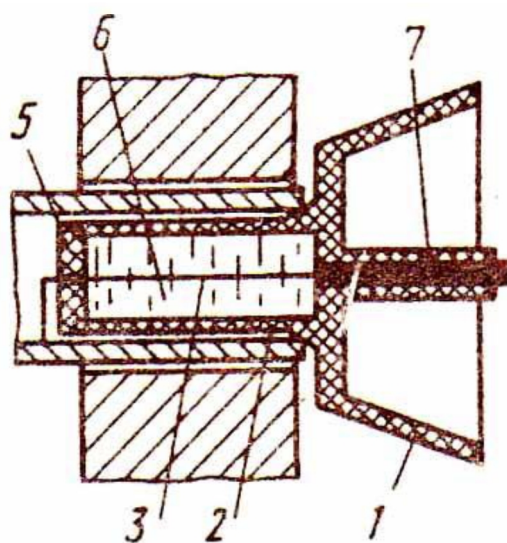


Рисунок 59 – Конструкция разового патрона

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.

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 x 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 (рисунок 60).

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

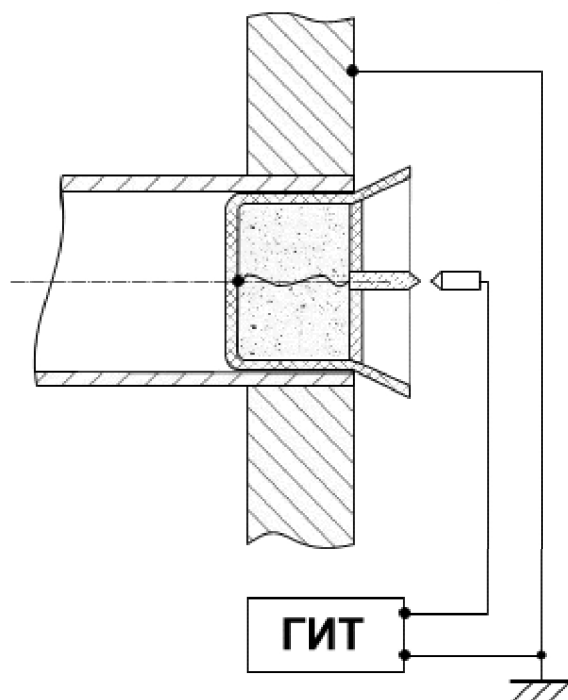


Рисунок 60 – Схема подключения ПЭВ к ГИТ

Таким образом, подготовленные 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 %.

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

5.5.3 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 рисунке 61.

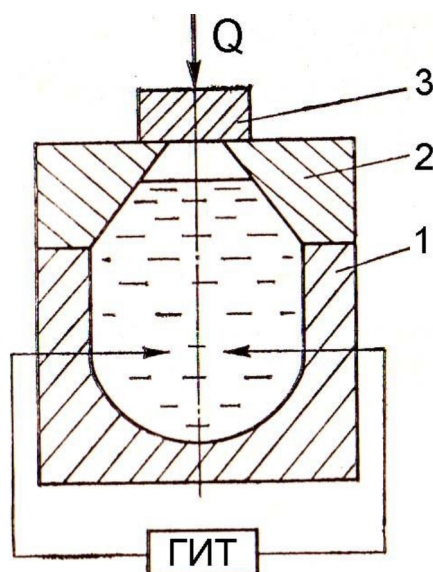


Рисунок 61 – Схема ЭГИ упрочнения металлов водовоздушными струями

1 – разрядная камера; 2 – коническая насадка; 3 – инструмент

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

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 5)

Таблица 5 – Изменение микротвердости металлов

Материал	Микротвердость $HV \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$	
	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.

5.5.4 Электрогидравлическая очистка литья

Для получения в отливках различного вида полостей используются стержни, изготавливаемые, например, из песчано-цементных смесей (рисунок 62).

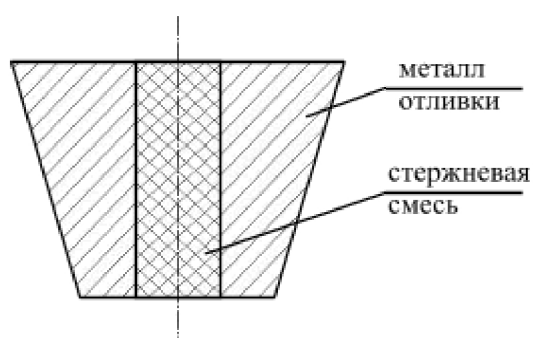


Рисунок 62 - Отливка со стержнем, формирующим внутреннюю полость

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 (рисунок 63).

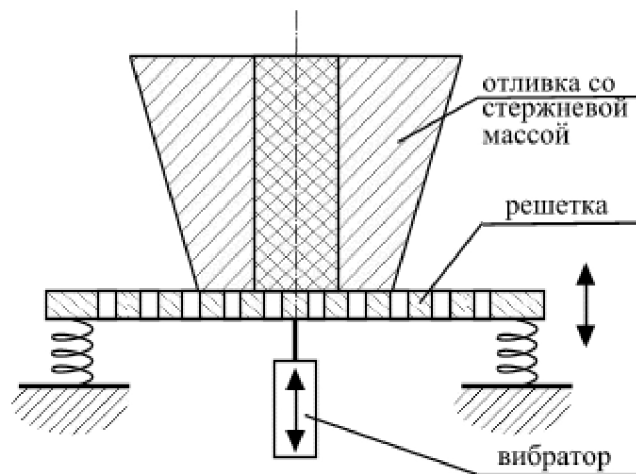


Рисунок 63 – Вибро-ударный метод удаления стержневой смеси

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.

Особую проблему операция удаления стержневых масс приобретает 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 (рисунок 64).

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.

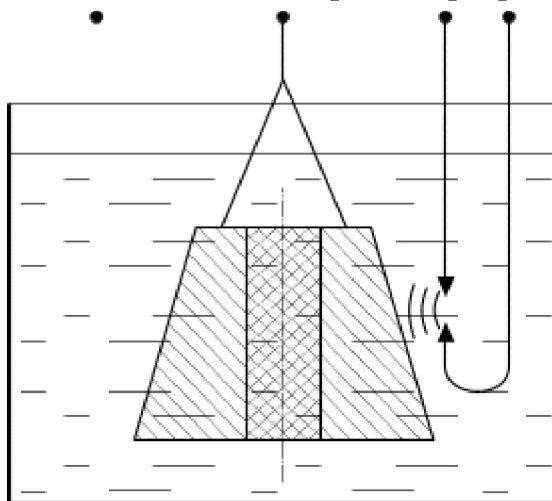


Рисунок 64 – Схема электрогидравлической очистки литья

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 волна в стержень 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 (вибро-ударными);
- 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.

5.5.5 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 вибро-ударное их разрушение отбойными молотками. Такой техпроцесс малопроизводителен, является физически тяжелым и небезопасным для здоровья человека.

Электрогидроимпульсная технология предусматривает: сверление отверстий $\varnothing 40$ мм на глубину порядка $2/3$ от толщины фундаментального блока; заливку в отверстие воды, погружение в отверстие с водой электродов и электроразряд в жидкости (рисунок 65).

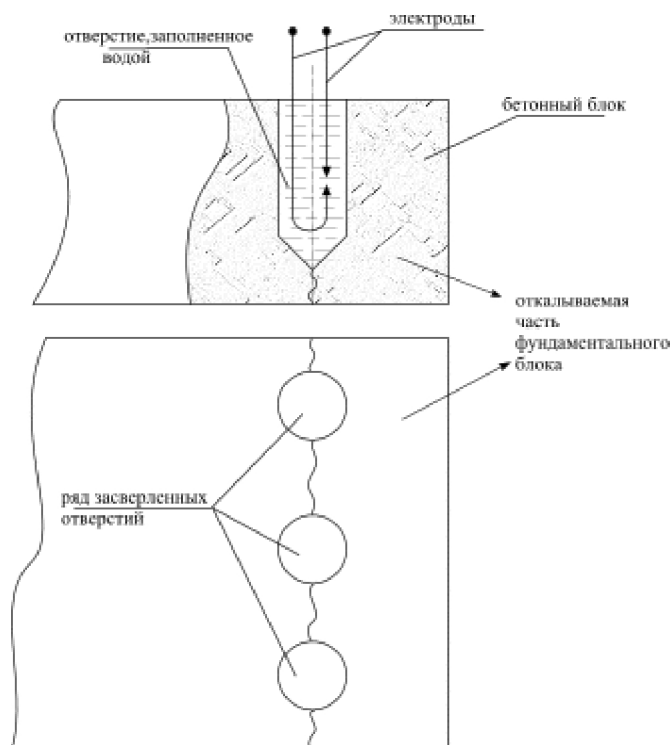


Рисунок 65 – Схема разрушения фундаментальных блоков

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.

ВЫВОДЫ

1. Электрогидравлический эффект – высоковольтный разряд в жидкости.
2. Силовое воздействие на объект – ударные волны и гидросток.
3. Оборудование для электрогидроэффекта – электротехническая установка, включающая повышающий трансформатор, выпрямитель, батарею конденсаторов, разрядник, электроды.
4. Существуют различные конструкции электродных систем: линейные, коаксиальные, одно- и многоточечные и др.
5. С энергетической точки зрения эффективность электроимпульсного воздействия зависит от напряжения; расстояния между электродами; энергии, запасенной в конденсаторной батарее; расстоянии от электродов до объекта и других факторов.
6. Область применения: штамповка, очистка литья от стержневых масс, брикетирование, разрушение фундаментных блоков, упрочнение и др.

6 МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ (МИОМ)

Физические основы. Технологические
схемы. Конструктивно-технологические
параметры.
Примеры технологического применения.

6.1 Физика процесса

Представление о физике процесса МИОМ начнем с описания демонстрационного эксперимента (рисунок 66).

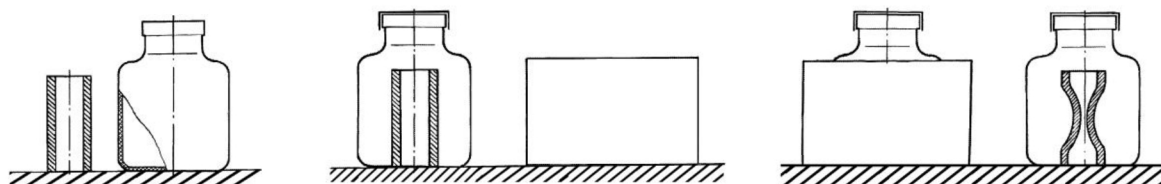


Рисунок 66 – Демонстрационный эксперимент

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?

Но, 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 (рисунок 67).

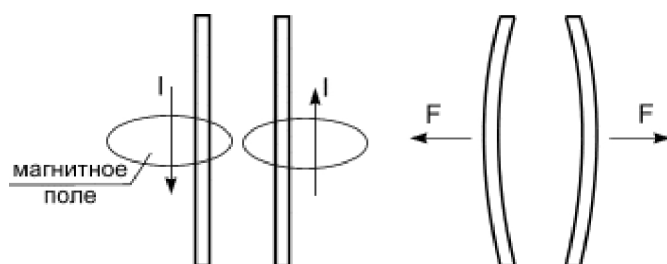


Рисунок 67 – Взаимодействие магнитных полей проводников с током I

Откроем черный ящик. Внутри его расположена катушка (соленоид) – индуктор, соединенный с магнитно-импульсной установкой (МИУ) (рисунок 68).

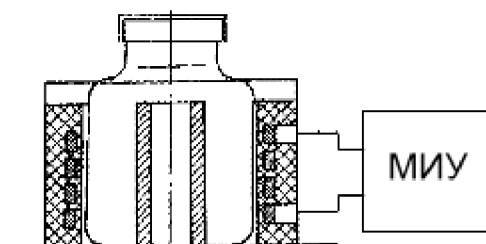


Рисунок 68 – Схема магнитно-импульсной обработки

Блок схема магнитно-импульсной установки, аналогична блок схеме генератора импульсных токов при ЭГШ (рисунок 69), т.е. она также состоит из повышающего трансформатора 1, выпрямителя 2, батареи конденсаторов 3 и разрядника 4.

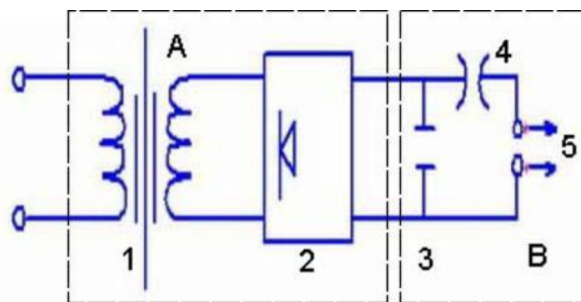


Рисунок 69 – Блок-схема магнитно-импульсной установки (МИУ)

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 (рисунок 70) разряда батареи конденсаторов.

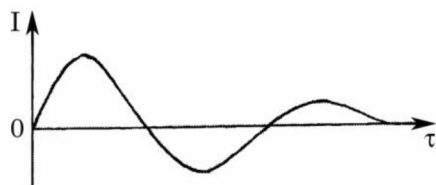


Рисунок 70 – Ток разряда батареи конденсаторов в индукторе

Этот ток, как видно из рисунка 70, 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 (рисунок 71). Прочная катушка остается неподвижной, а заготовка под действием сил P , отталкиваясь от нее, деформируется.

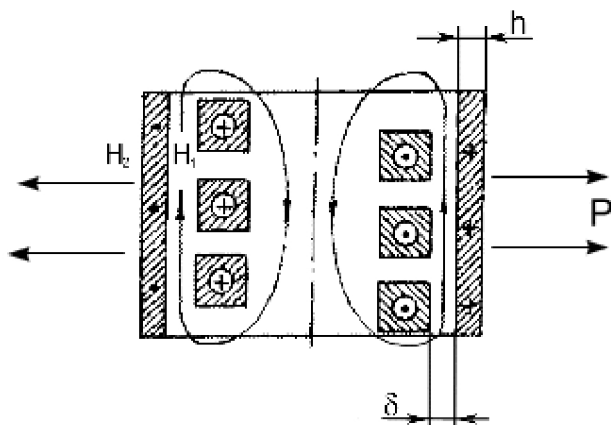


Рисунок 71 – Электродинамические силы в системе индуктор - заготовка

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 (рисунок 72).

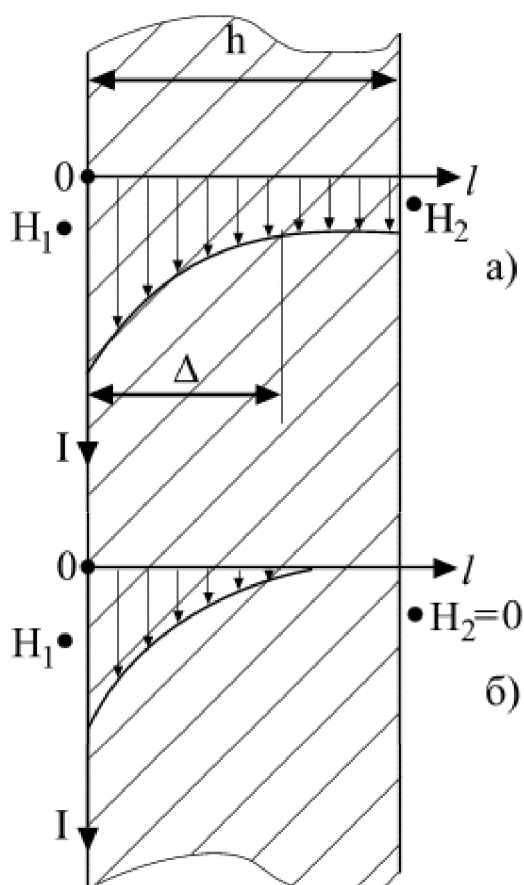


Рисунок 72 – Распределение вихревого тока по толщине заготовки ($\Delta < h$)

h – исходная толщина стенки заготовки

Δ - глубина проникновения тока в металл заготовки (толщина скин-слоя)

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.

Глубина проникновения тока в металл заготовки определяется по формуле

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

где ω - круговая частота разрядного тока: $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ (рисунок 73);

γ - удельная электропроводность материала проводника (1/Ом.м);

μ_0 - абсолютная магнитная проницаемость вакуума ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м)

μ - магнитная проницаемость материала заготовки.

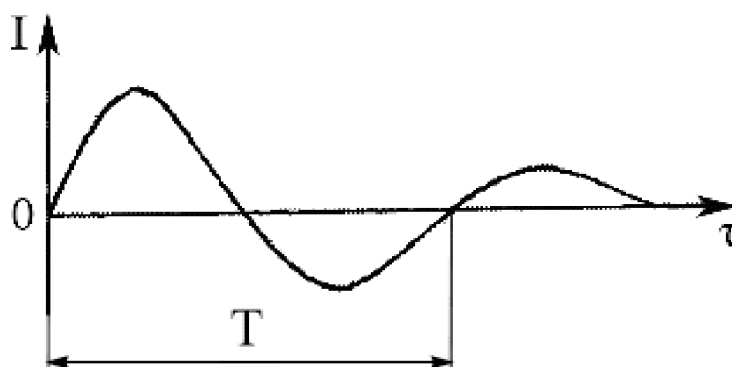


Рисунок 73 - Ток в цепи разряда батареи конденсаторов
(T – период колебания)

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 ит.д.). Для таких цепей кривые разрядного тока будут различны.

Условно подразделим их на высоко- и низкочастотные (рисунок 74).

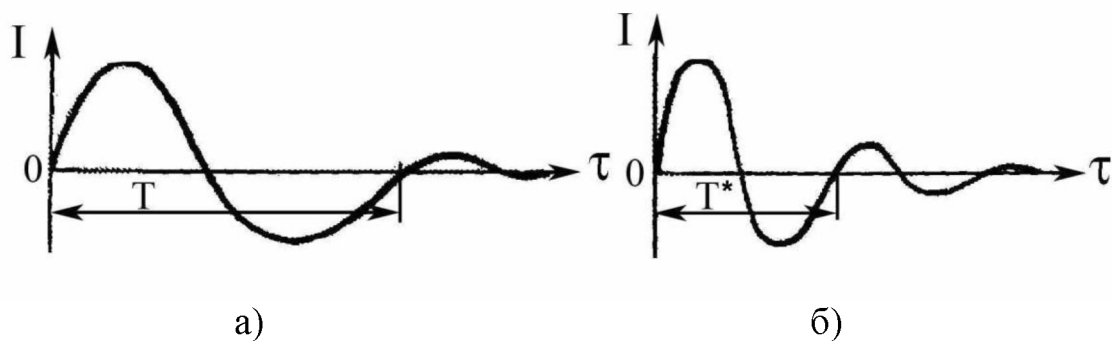


Рисунок 74 – Внешний вид токовых кривых в зависимости от параметров разрядной цепи
а) низкочастотная; б) высокочастотная разрядные цепи
 $T > T^*$

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

Таблица 6 - 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	0,5
АМг6М	4,24	1,34	0,77
Д16М	3,25	1,02	0,59
МА8-М	3,6	1,14	0,66
Ст3	6,45	2,04	1,18
Х18Н9Т	13,5	4,2	2,46
ВТ5	18,7	5,91	3,41

Из таблицы 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 $W = CU^2/2$ (C – емкость конденсаторной батареи; U – напряжение батареи) и от геометрических размеров обрабатываемой заготовки, вернее объема пространства между индуктором и заготовкой V (рисунок 75).

$$P = W/V = W/\pi D l \delta$$

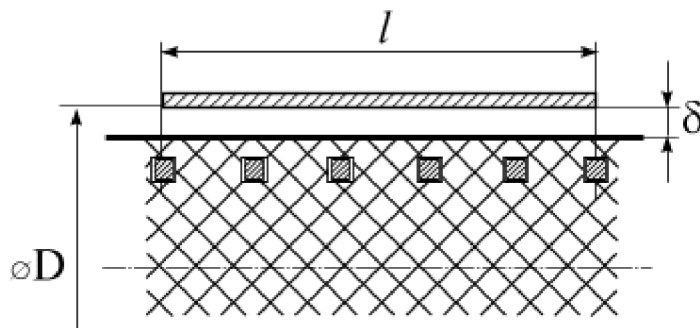


Рисунок 75 – Соотношение геометрических размеров заготовки и индуктора

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 P 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 противодействия.

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

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

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

R – активное сопротивление разрядной цепи, Ом;

V – условный объем заготовки, через который протекает ток, м³;

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

ρ – плотность материала заготовки, кГ/м³.

Время разряда τ составляет $10^{-4} \dots 10^{-5}$ сек, максимальное значение тока I в заготовке 50 ... 200 кА.

При этих значениях τ и $I_{\max}$ величина ΔT для алюминиевых заготовок может достигать 80 ... 150⁰С.

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 спроектировать (рассчитать) так 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 магнитно-прозрачного материала (стекло, керамика и других материалов), 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 $V = 10 \dots 250$ м/сек, малым машинным временем $10^{-4} \dots 10^{-5}$ сек.

6.2 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/сек или деформации коэффициент динамичности $K(\delta)$ имеет большие значения (таблица 7).

Таблица 7 – Коэффициенты динамичности

Марка материала	АМг3М	АМг6М	X18H10T	BT14
K (δ)	2,13 – 2,5	2,11 – 2,18	1,21 – 1,35	1,12 – 1,2

Причины повышения значений $K(\delta)$ 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.

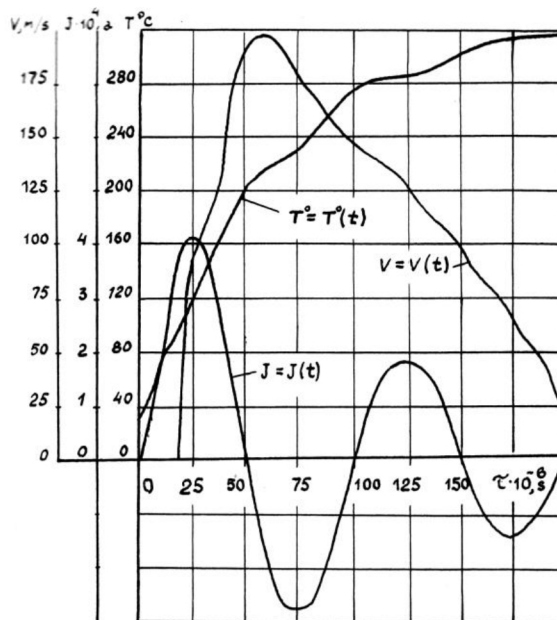


Рисунок 76 – Изменение температуры T , скорости деформирования V и силы тока I во времени τ

На рисунке 76 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°C . С увеличением энергии деформирования до 7 кДж температура нагрева заготовки может достичь уже 200°C , что согласно диаграмме пластичности (Рисунок 77) и вызывает дополнительное увеличение предельной деформации.

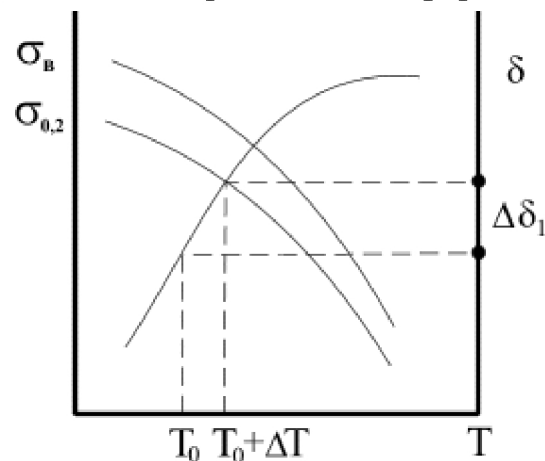


Рисунок 77 – Диаграмма пластичности

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 (рисунок 78).

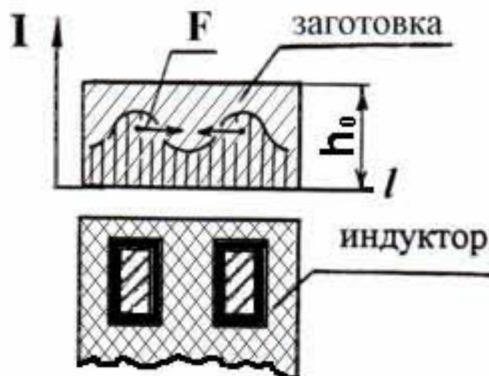


Рисунок 78 – Распределение вихревого тока по заготовке

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

Кроме того, осевой подпор, может быть вызван специальным технологическим приемом – выдвиганием витков индуктора за край заготовки (рисунок 79). В этом случае взаимодействие токов в крайних витках индуктора с токами в заготовке и приведет к дополнительным осевым усилиям.

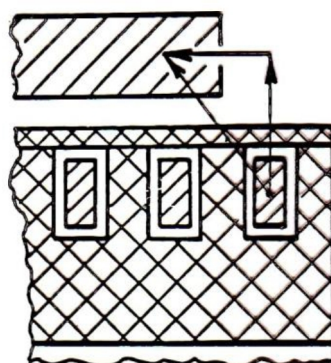


Рисунок 79 – Силовое давление, обусловленное взаимодействием токов в крайних витках индуктора и в заготовке

С учетом инерционных сил, в заготовке возникает уже не плоская схема напряжений, а объемная с двумя сжимающими напряжениями. Увеличение доли сжимающих напряжений (рисунок 80) приводит к дополнительному увеличению предельных деформаций.

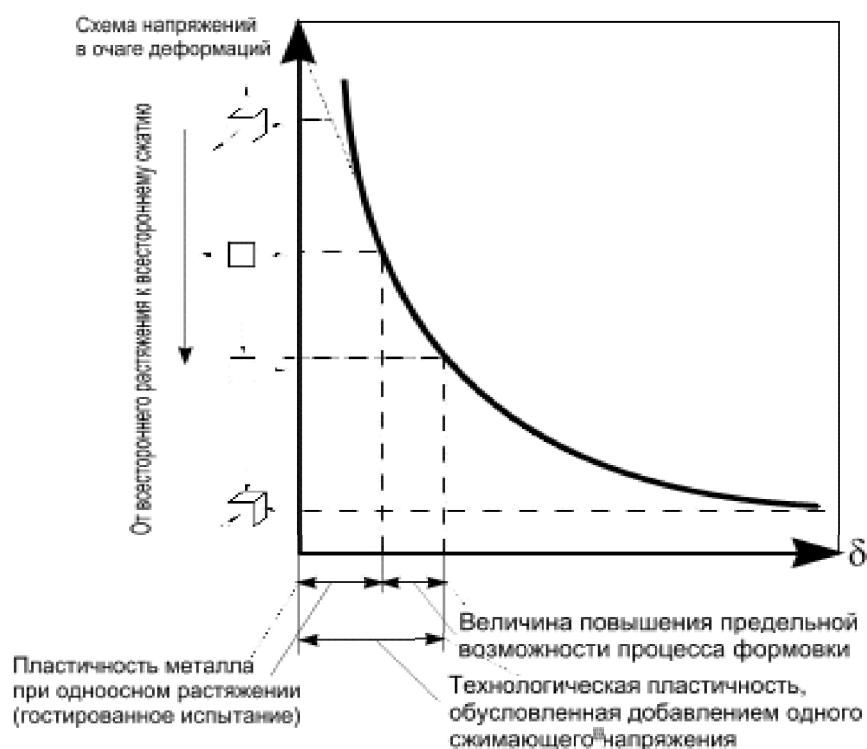


Рисунок 80 – Технологическая пластичность металлов

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 (рисунок 81) 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).



Рисунок 81 – Схема обтекания наведенным током микротрещин, расположенных в заготовке
а – поперек; б – вдоль протекания направления протекания тока

6.3 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 (рисунок 82).

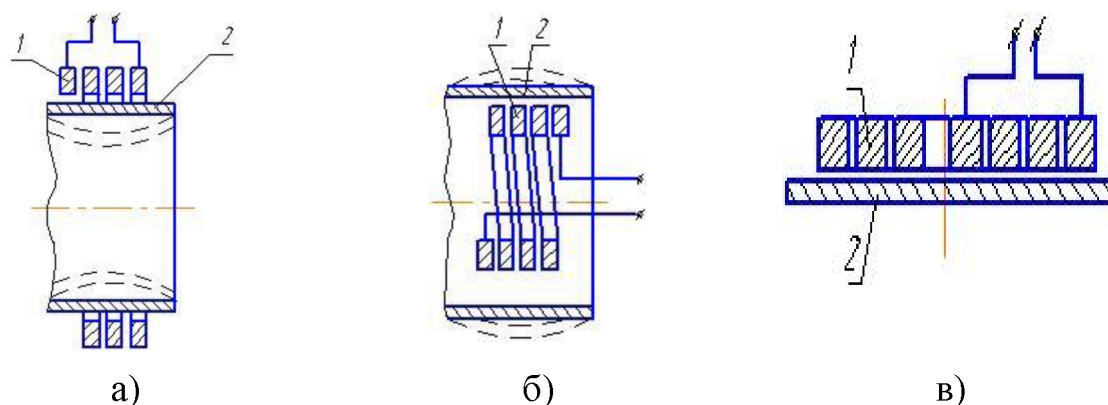


Рисунок 82 – Схемы штамповки

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» (рисунок 83).

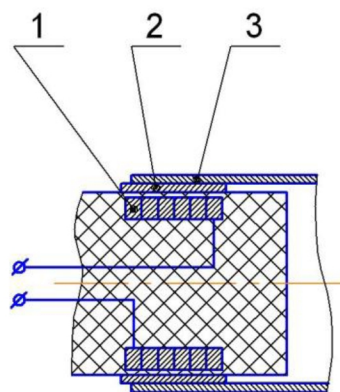


Рисунок 83 – Схема штамповки со «спутником»

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 (рисунок 84).

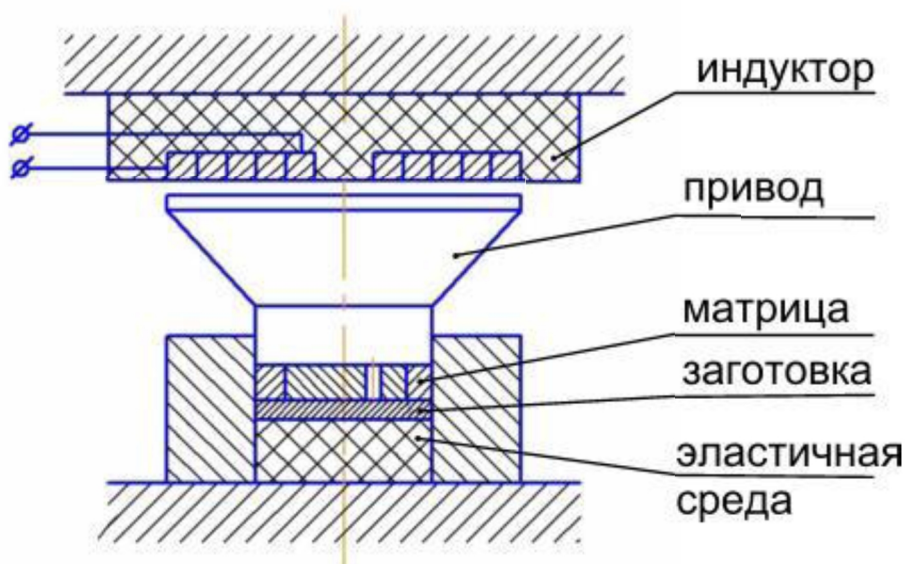


Рисунок 84 – Схема магнитно-импульсного привода

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.

6.4 Индукторные системы для магнитно-импульсной обработки

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

Типовая конструкция цилиндрического витого индуктора «на раздачу» представлена на рисунке 85.

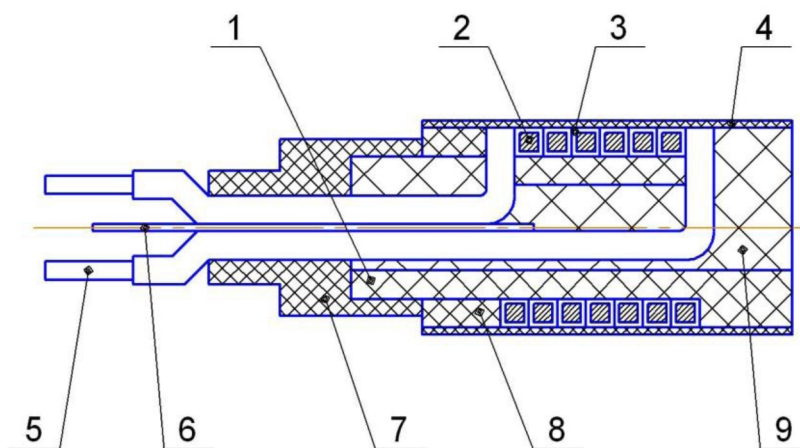


Рисунок 85 – Цилиндрический индуктор «на раздачу»

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), выпускаемая кабельной промышленностью, сечением, например: 4x5; 3x7; 2x9 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 ($U_v = U_p/n$).

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 диэлектрическими материалов. 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 (рисунок 86).

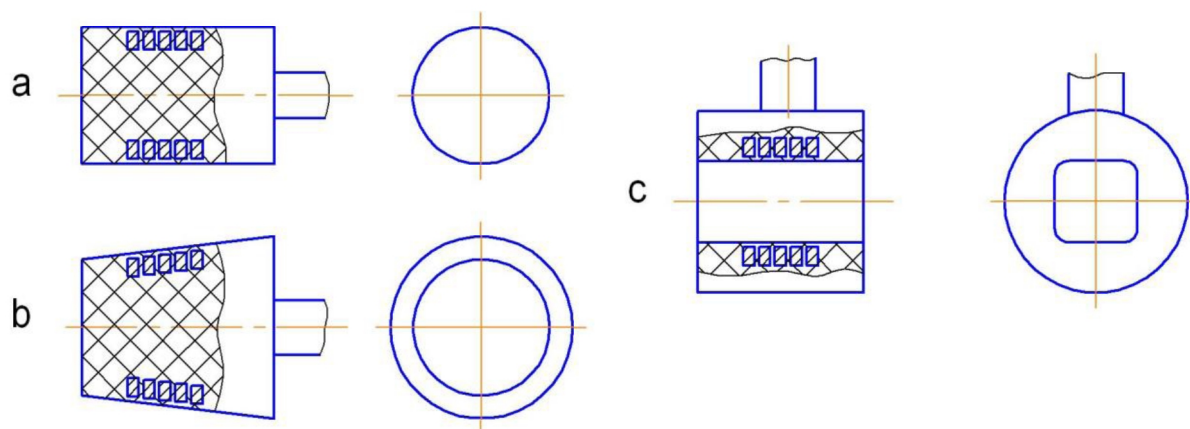


Рисунок 86 – Возможные формы поперечного сечения индукторов
а – цилиндрический; б – конический; с - квадратный

Аналогично и образующая индуктора определяется формой заготовки: ожевальной, конусной, сложной формы (рисунок 87).

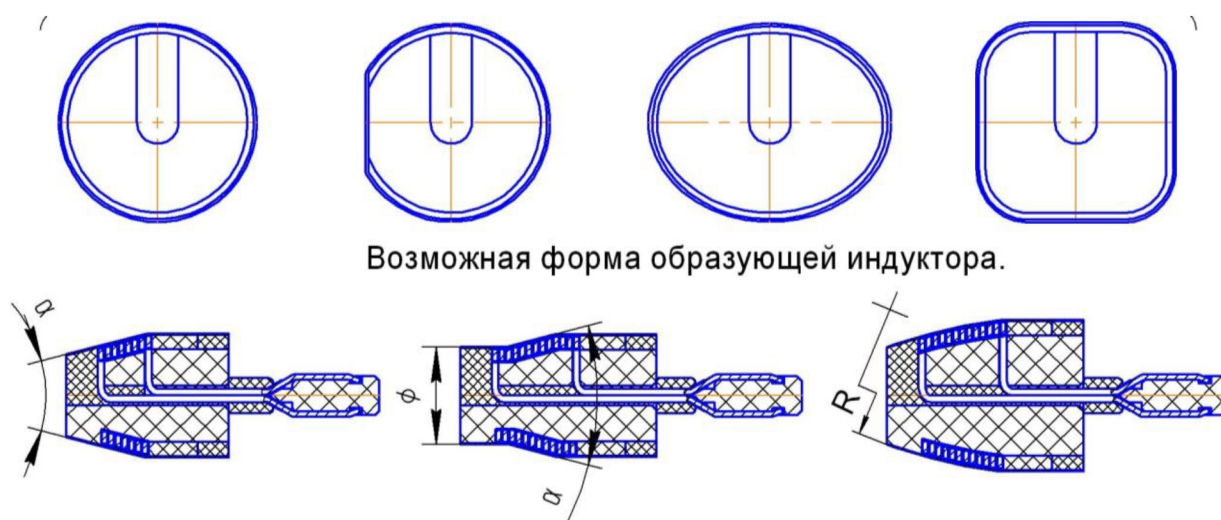


Рисунок 87 – Возможные формы образующей индукторов

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 (рисунок 88) круглой, прямоугольной, треугольной, овальной и т.д.

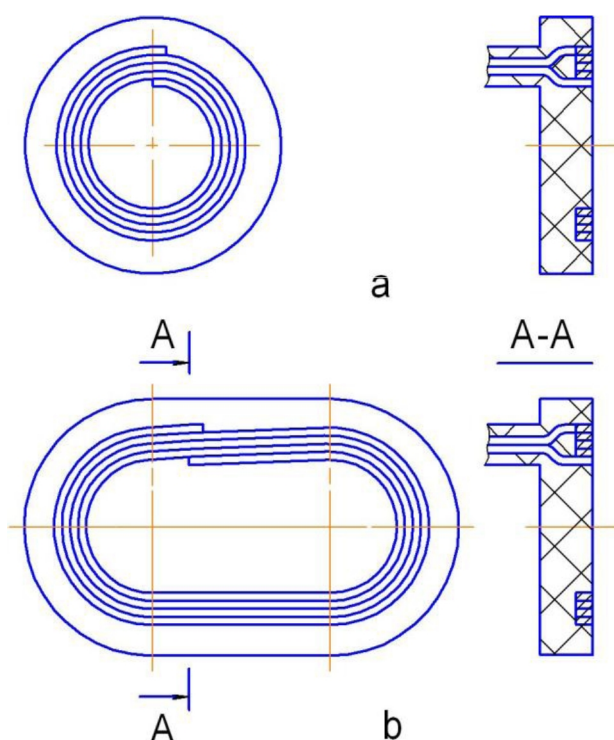


Рисунок 88 – Возможные формы индуктора для плоской штамповки

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.

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

Основная задача 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.

6.5 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.

6.5.1. 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 рисунках 90, 91, 92.

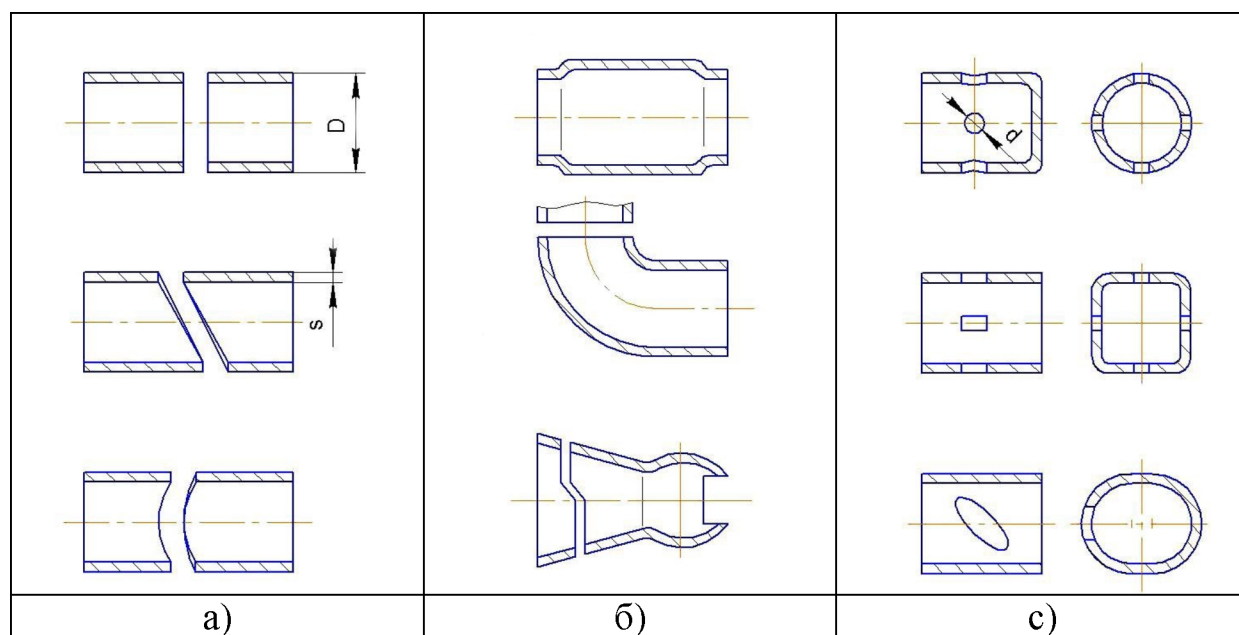


Рисунок 90 – Возможные операции резки труб:
а) с перпендикулярной и наклонной линией реза «на раздачу»
и «обжим»; б) обрезка припуска; в) пробивка отверстий

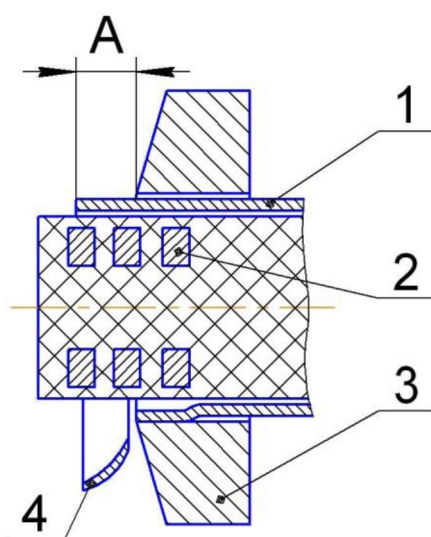


Рисунок 91– Схема обрезки припуска «на раздачу»
1 – заготовка; 2 – индуктор; 3 – матрица;
4 – обрезанный припуск (отход)

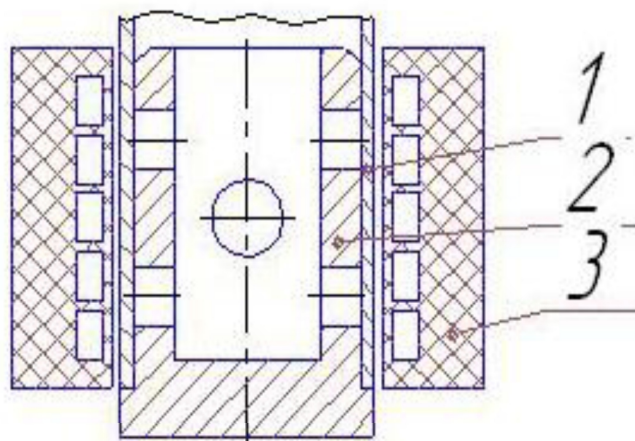


Рисунок 92 – Схема групповой пробивки отверстий «на обжим»
1 – заготовка; 2 – матрица; 3 - индуктор

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 (рисунок 93);

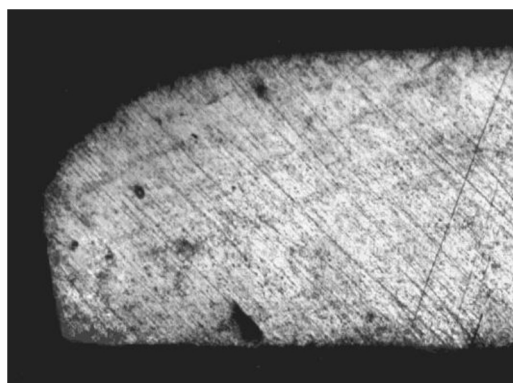


Рисунок 93 – Форма кромки детали после вырезки

- 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 (рисунок 94);

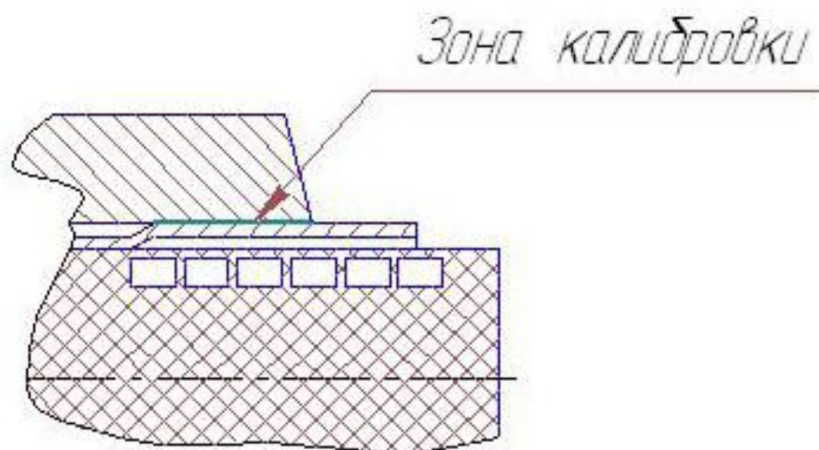


Рисунок 94 – Обрезка припуска и калибровка
зоны прилегающей к линии реза

- не требуется дополнительная торцовка детали для обеспечения, например, перпендикулярности поверхности разделения к оси заготовки (рисунок 95).

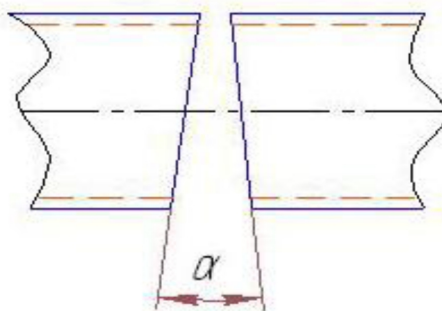


Рисунок 95 – Обеспечение перпендикулярности линии реза

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

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

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 (рисунок 96), потребуется значительное повышение потребной энергии разделения. Это приведет к резкому снижению ресурса МИУ и индуктора.

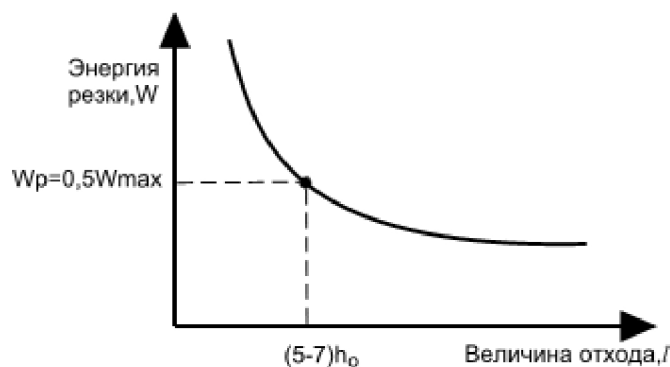


Рисунок 96 – Зависимость потребной энергии резки от величины отхода l при обрезке припуска и разрезке на мерные длины труб с толщиной стенки h_0

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 хорошоэлектропроводных 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 рисунке 97 в качестве примера показаны образцы деталей, при производстве которых использовались операции магнитно-импульсной резки.

На рисунке 98 представлены образцы деталей, отверстия в которых пробивались с использованием энергии импульсного магнитного поля.



Рисунок 97 – Образцы деталей, полученных с использованием операций магнитно-импульсной резки



Рисунок 98 – Пробивка отверстий в деталях с использованием энергии импульсного магнитного поля

Форма пробиваемых отверстий может быть разной: круглой, прямоугольной, сложной.

На рисунке 99 представлен образец промышленной оснастки, удовлетворяющей мерам техники безопасности. Приспособление имеет корпус, предотвращающий разлет заготовок.

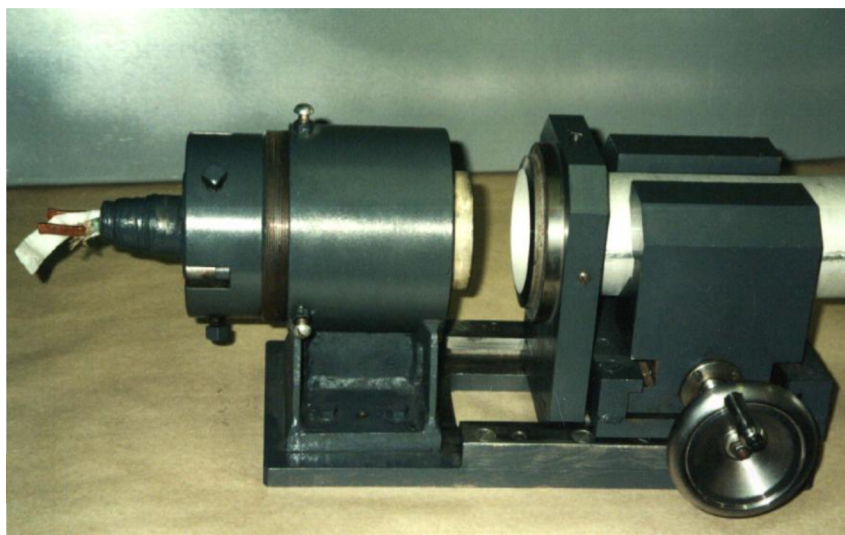


Рисунок 99 – Внешний вид промышленного приспособления для обрезки припуска у полых деталей (сварных труб)

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 сек.

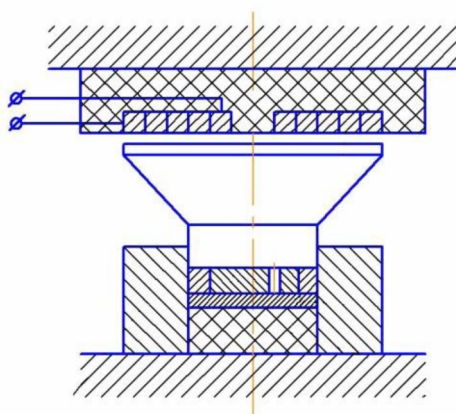


Рисунок 100 – Вырубка-пробивка отверстий через промежуточную среду

На плоских заготовках осуществляют операции вырубки-пробивки как непосредственно импульсным магнитным полем, так и через промежуточную, например, эластичную среду (рисунок 100).

Технологический процесс вырубки-пробивки через эластичную среду рекомендуется для получения деталей вне зависимости от электрической проводимости заготовки.

6.5.2. Формообразующие магнитно-импульсные операции.

С помощью магнитно-импульсных формообразующих операций из полых заготовок получают конуса, переходники, рифты, фланцы, оболочки, детали сложной формы (рисунок 101) с использованием технологических схем как «на раздачу», так и «на обжим».



Рисунок 101 – Детали, полученные формовкой импульсным магнитным полем

На плоских заготовках производят, в основном, операции гибки-формовки, в том числе отбортовки наружного и внутреннего контура (рисунок 102).

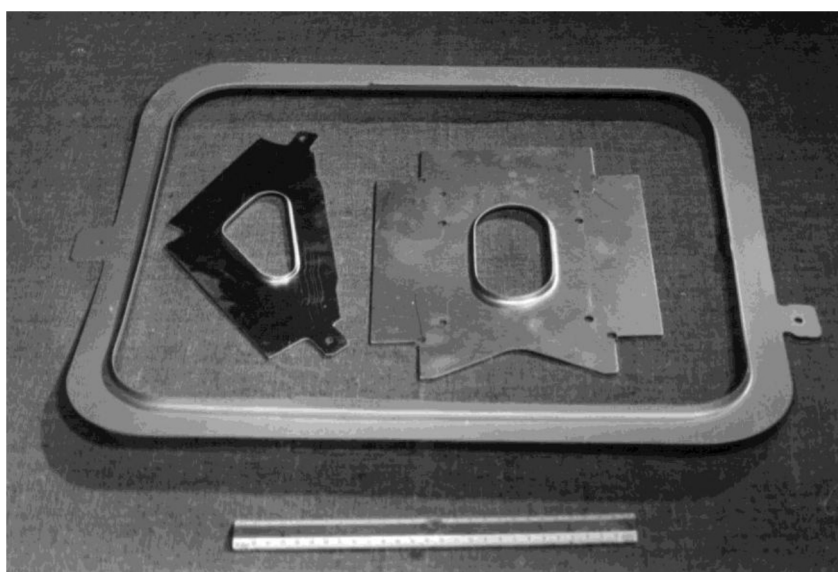


Рисунок 102 – Плоские детали, отштампованные с применением ИМП

На рисунке 101 приведены фотографии деталей, полученных с использованием магнитно-импульсных формообразующих технологий, а на рисунке 103 - промышленная оснастка для формовки «конуса».

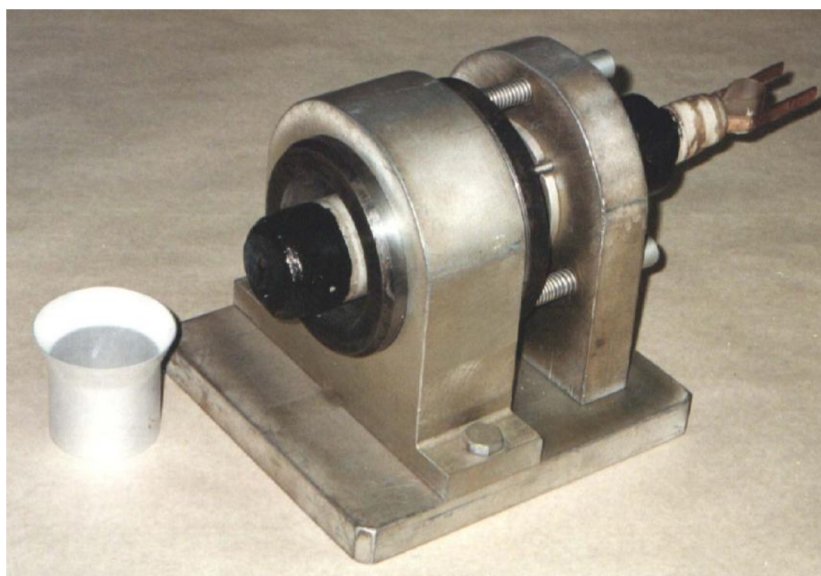


Рисунок 103 – Технологическая оснастка для формовки конуса

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 8).

Таблица 8 – Изменение окружной деформации заготовки (АМг6М) после соударения с матрицей (Сталь 45)

$V_I, \text{ м/с}$	5	10	15	20	25	30	35	40
$\varepsilon_{\phi}, \%$								
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 (рисунок 104).

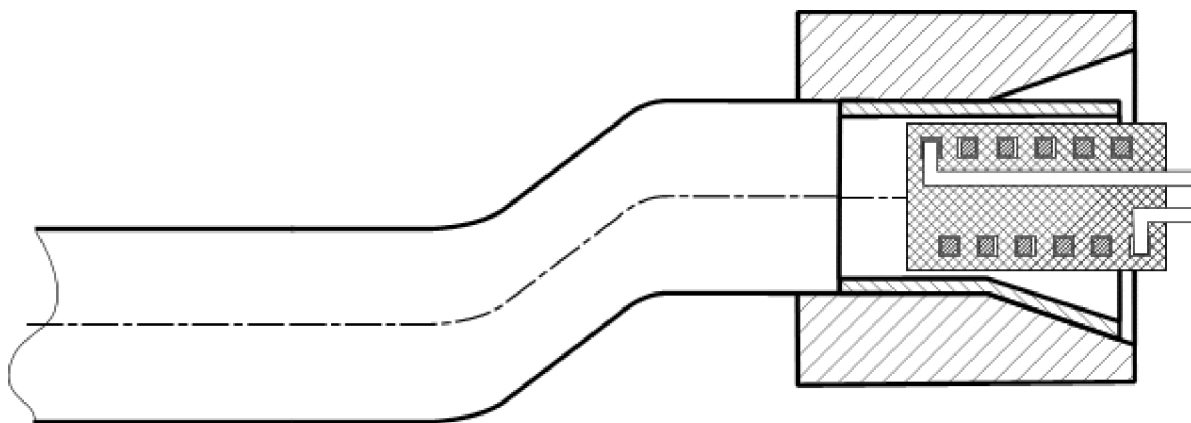


Рисунок 104 – Формообразование длинномерных изделий

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 (рисунок 105).

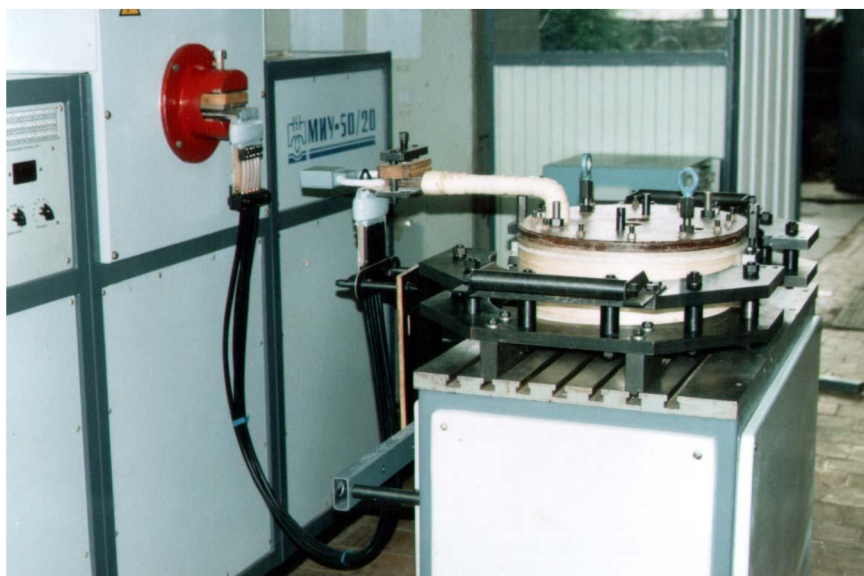


Рисунок 105 – Подключение индуктора к установке гибким кабелем

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 «отпаяек» индуктора (б, в, г, д, е) (рисунок 106).

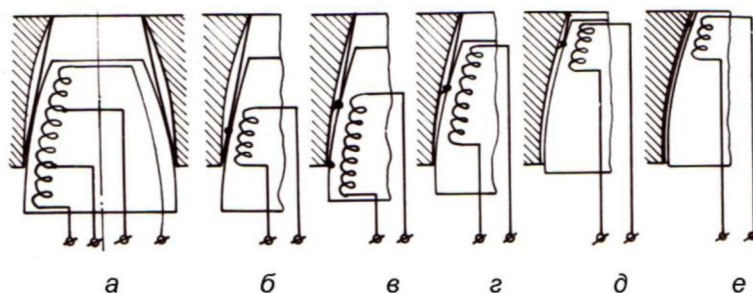


Рисунок 106 – Схема поэлементного формообразования оболочки.

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 ($\varnothing 1000 \times 1000$ 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 плохоелектропроводных материалов;
- недостаточная стойкость индукторных систем малого диаметра;
- повышенные требования по технике безопасности при работе на установках свыше 1000 В.

6.5.3. Магнитно-импульсная калибровка

Магнитно-импульсная калибровка как самостоятельная операция применяется для обеспечения высокоточной подгонки друг к другу свариваемых деталей (рисунок 107), для перевода технологии сварки с ручного на автоматический режим.

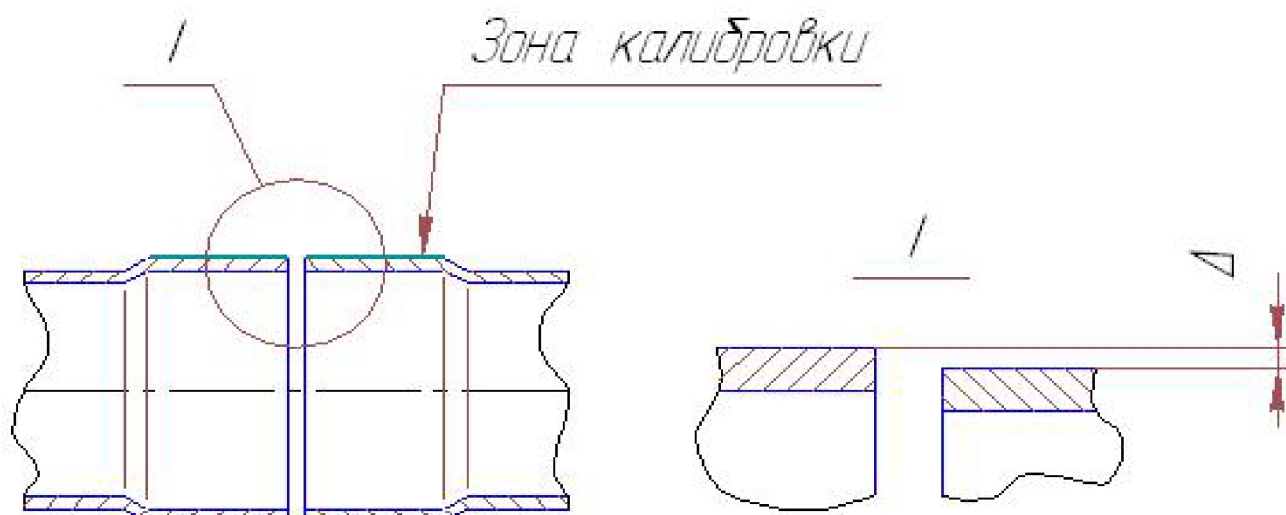


Рисунок 107 – Магнитно-импульсная калибровка

В этом случае калибровке подвергаются концы свариваемых деталей. Превышение кромок Δ не более $0,1 h_0$.

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.

6.5.4. 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) допуска между деталями свободные, возможен даже зазор в $0,5 \dots 1,0$ 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 заполнения материалом заготовки микронеровностей контр-

детали (рисунок 108), что обеспечивает герметичность соединения, повышенное усилие выпрессовки.

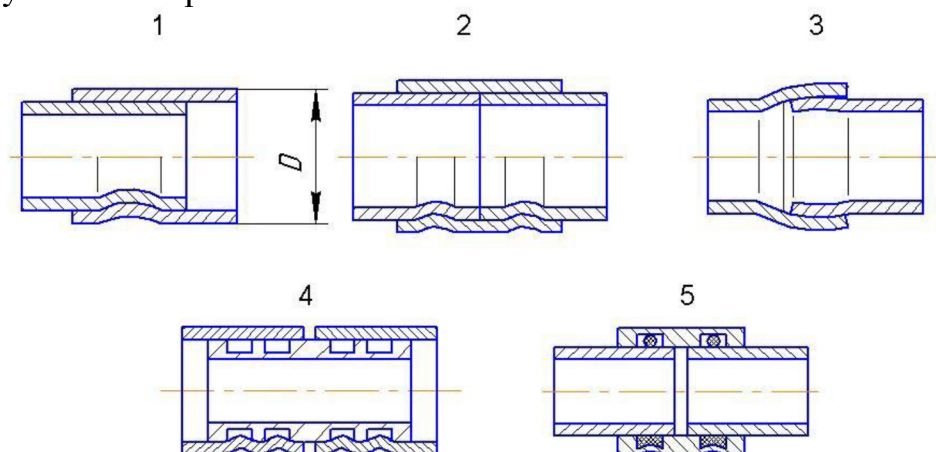


Рисунок 108 – Возможные операции магнитно-импульсной сборки

Высокие значения усилия выпрессовки даже после среза микронеровностей объясняются действием дополнительных термических (действие вихревых токов) напряжений, возникающих в заготовке после ее обжатия и охлаждения.

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 рисунке 109. При этом используется операция завальцовки.

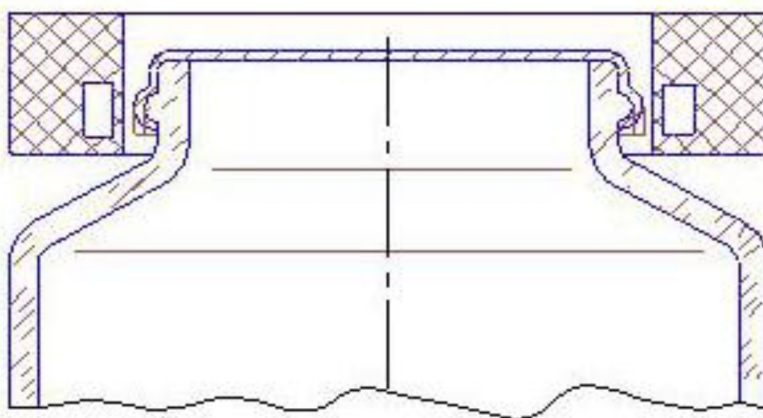


Рисунок 109 – Завальцовка стеклянных бутылок

На рисунке 110 показана технологическая схема сборки трубы с металлической законцовкой.

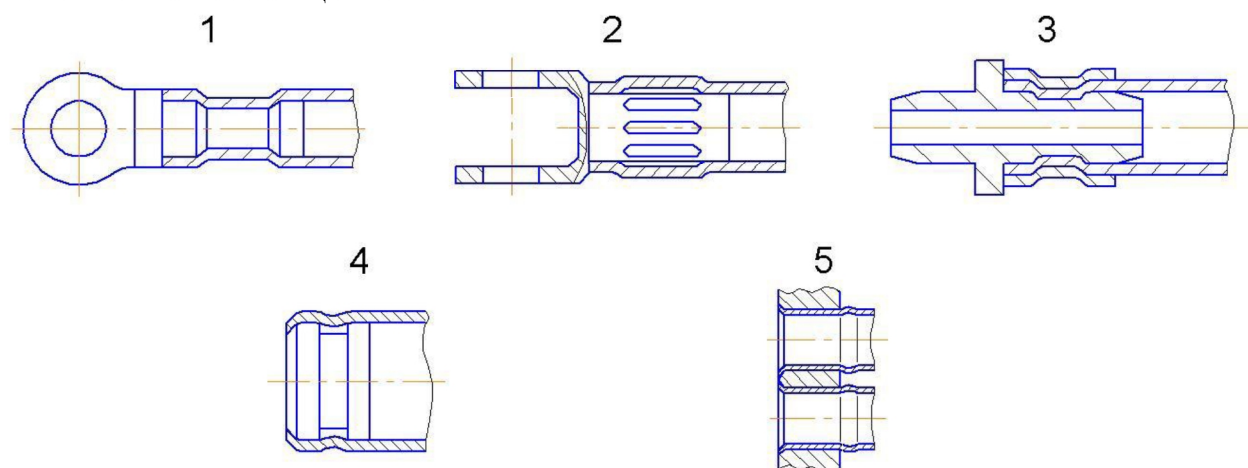


Рисунок 110 – Схемы сборки трубчатых деталей с законцовками

Такие соединения используются при изготовлении спортивных снарядов, лыжных палок, тяг управления и т.д. Выполняемая технологическая операция – зиговка. Получаемое соединение – неразъемное.

Магнитно-импульсная сборка в ряде случаев определяет конструкцию соединения, то есть создаваемое конструктором соединение изначально ориентированно на магнитно-импульсную сборку. Так, например, сборочный узел голеностопного протеза, представленный на рисунке 111, предусматривал калибровку трубы с точностью $\pm 0,05$ мм, установки ее в механически обработанную полость литой детали, сверление поперечных отверстий под заклепочное или болтовое соединения.

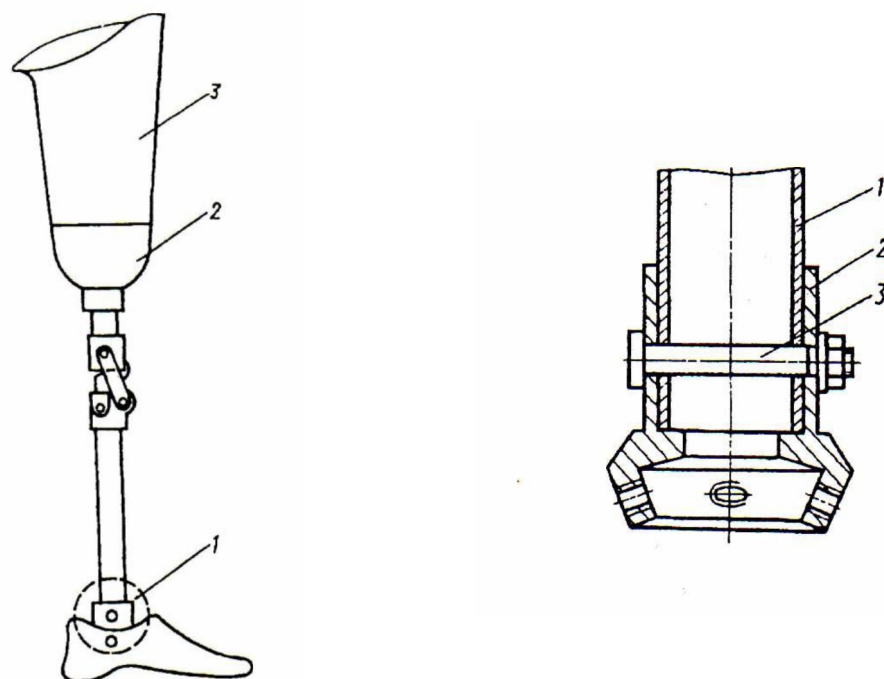


Рисунок 111 – Схема протеза ноги

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 (рисунок 112).

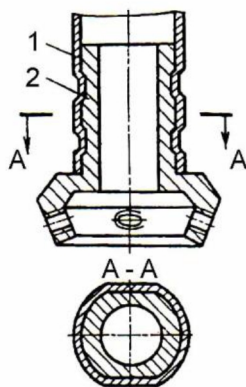


Рисунок 112 – Конструкция сборочного узла
при магнитно-импульсной сборке

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 рисунка 113 показаны примеры сборочных соединений, нашедших применение в промышленности: сборка предохранителей, биметаллических заземлителей, наконечников электрожгутов, тросов и многих других.



Рисунок 113 – 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 контр-детали из хрупких материалов без следов разрушения;
- термические напряжения, возникающие в охватываемой детали как результат ее охлаждения после разогрева вихревыми токами, повышает 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.

6.5.5 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



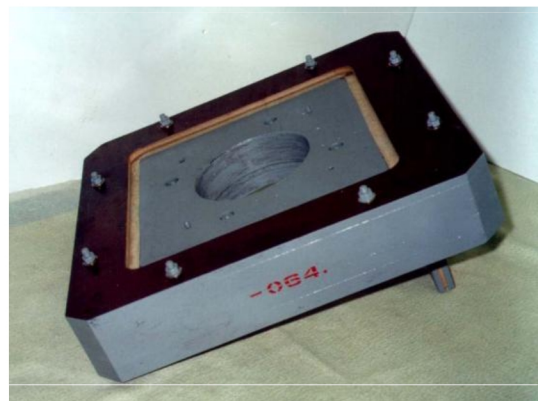
Индукторы на раздачу



Плоский индуктор



Индуктор на обжим



Специальные индукторы для отбортовки

ВЫВОДЫ

1. В основе магнитно-импульсной обработки – воздействие на объект импульсным магнитным полем высокой напряженности. Нагружение является «бесконтактным», объемным, невидимым магнитным полем.
2. Деформированию подвергаются образцы, детали из хорошоэлектропроводных материалов.
3. Магнитно-импульсные установки имеют зарядный (повышающий трансформатор, выпрямитель) и разрядный контур (батарею конденсаторов, разрядник). В установках нет подвижных элементов.
4. В качестве инструмента при магнитно-импульсной обработке используется индуктор (катушка).
5. Форма индуктора определяется формой заготовки и выбранной схемой обработки: «на раздачу», «на обжим», «плоская», одно- и многовитковые, витые и точеные.
6. Область применения: штамповка, сборка, сварка, клепка и другие.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

РАСЧЕТ ПОТРЕБНОЙ ЭНЕРГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДАХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Полная работа или потребная энергия формообразования для получения готовой детали определяется из выражения:

$$A = \int_0^V \left[\int_0^{e_i} \sigma_i(e_i) de_i \right] dV$$

Для единичного объема удельная работа или удельная энергия формообразования будет:

$$a = \int_0^{e_i} \sigma_i(e_i) de_i,$$

где σ_i - интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \text{ а}$$

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

$$\sigma_i = k e_i^n,$$

где k, n – коэффициенты степенной аппроксимации кривой упрочнения.

Тогда выражение для удельной энергии формообразования преобразуется к виду

$$a = \int_0^{e_i} k e_i^n de_i = \frac{k}{1+n} e_i^{1+n}$$

и полная энергия формообразования

$$A = aV = \frac{k}{1+n} e_i^{1+n} V,$$

где V – объем деформируемого материала.

Рассмотрим конкретный пример:

Чертеж готовой детали приведен на рисунке 1; исходной заготовки – на рисунке 2; технологическая схема изготовления такой детали с использованием импульсных технологий – на рисунке 3.

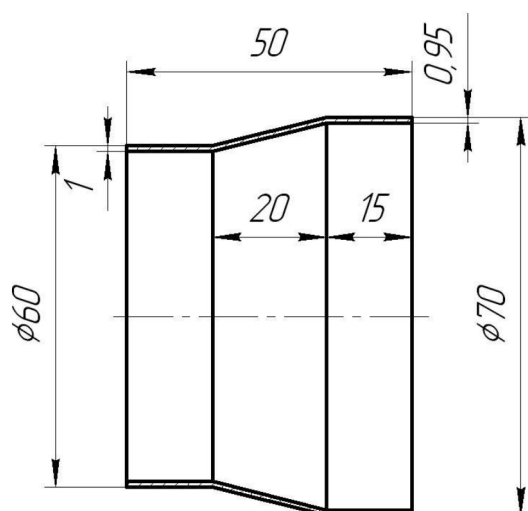


Рисунок 1 – Готовая деталь – «переходник»

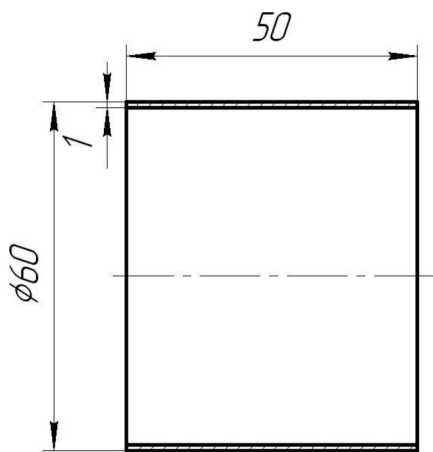


Рисунок 2 – Трубчатая заготовка

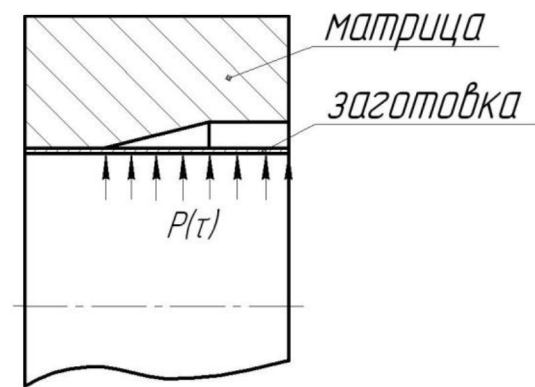


Рисунок 3 – Технологическая схема формовки «переходника»

Механические свойства металла заготовки:

$$\sigma_B = 25 \text{ кг/мм}^2, \sigma_{0,2} = 15 \text{ кг/мм}^2, \delta = 0,12, E = 7000 \text{ кг/мм}^2$$

коэффициенты динамичности:

$$K(\sigma_B) = 1,1 \quad K(\sigma_{0,2}) = 1,3 \quad K(\delta) = 1,5$$

Порядок расчета

1. Расчет констант динамических свойств металла

$$\sigma_B^{дин} = \sigma_B \cdot K(\sigma_B); \dots \sigma_B^{дин} = 25 \cdot 1,1 = 27,5 \text{ кг/мм}^2$$

$$\sigma_{0,2}^{дин} = \sigma_{0,2} \cdot K(\sigma_{0,2}); \dots \sigma_{0,2}^{дин} = 15 \cdot 1,3 = 19,5 \text{ кг/мм}^2$$

$$\delta^{дин} = \delta \cdot K(\delta); \dots \delta^{дин} = 0,12 \cdot 1,5 = 0,18$$

2. Определение истинных констант механических свойств

Истинный предел прочности

$$S_B = \sigma_B^{дин} (1 + \delta^{дин}) = 27,5 (1 + 0,18) = 32,45 \text{ кг/мм}^2$$

Истинный предел текучести

$$S_{0,2} \approx \sigma_{0,2}^{дин} = 19,5 \text{ кг/мм}^2$$

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

$$e_B = \delta = 0,18$$

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_B , e_B).

$$S_{0,2} = k e_{0,2}^n$$

$$S_B = k e_B^n$$

Решая эту систему двух уравнений, получим:

$$n = \frac{\ln(S_B / S_{0,2})}{\ln(e_B / e_{0,2})}; \dots \dots \dots k = \frac{S_B}{e_B^n}$$

$$n = \frac{\ln \frac{32,45}{19,5}}{\ln \frac{0,18}{0,005}} = 0,14; \dots \dots k = \frac{32,45}{0,18^{0,14}} = 41,4 \text{ кЗ / мм}^2$$

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

$$e_{\theta} = \ln \frac{D_k}{D_0}; \dots \dots e_{\theta} = \ln \frac{70}{60} = 0,154$$

$$e_t = \ln \frac{t_k}{t_0}; \dots \dots e_t = \ln \frac{0,95}{1} = -0,051$$

третью осевую деформацию найдем из закона постоянства объема

$$e_{\theta} + e_t + e_z = 0 \quad e_z = -0,103$$

Интенсивность деформации для цилиндрической части:

$$e_{i(y)} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2},$$

при этом $e_1 > e_2 > e_3$ с учетом знака

$$e_1 = e_{\theta} = 0,154$$

$$e_2 = e_t = -0,051$$

$$e_3 = e_z = -0,103$$

$$e_{i(y)} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[0,154 - (-0,051)]^2 + [-0,051 - (-0,103)]^2 + [(-0,103) - 0,154]^2} = 0,14$$

6. Удельная работа деформации цилиндра составит

$$a_y = \frac{k}{1+n} e_{i(y)}^{1+n} = \frac{41,4}{1+0,14} 0,14^{1+0,14} = 3,86 \text{ кДж} / \text{мм}^2$$

7. Деформируемый объем металла (цилиндрической части)

$$V_{ц} = 2\pi R \cdot t_k \cdot l_{ц} = \pi \cdot 70 \cdot 0,95 \cdot 15 = 3132 \text{ мм}^3$$

8. Полная энергия формообразования цилиндрической части детали
 $A = a_{ц} \cdot V_{(ц)} = 3,86 \cdot 3132 = 12089,5 \text{ кгмм} = 12,1 \text{ кгм}$ что составляет 118,7 Дж $\approx 0,12 \text{ кДж}$.

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 $a_{i(k)}$

$$a_{i(k)} = \frac{k}{1+n} e_{i(k)}^{1+n} = \frac{41,4}{1+0,14} 0,07^{1+0,14} = 1,75 \text{ кДж} / \text{мм}^2$$

11. Деформируемый объем конусной части можно определить через объем той же части исходного цилиндра:

$$V_k = \pi D_0 \cdot t_0 \cdot l_k = \pi 60 \cdot 1,0 \cdot 20 = 3768 \text{ мм}^3$$

12. Полная работа деформации или потребная энергия для формообразования конусной части равна

$$A_k = a_{i(k)} \cdot V_k = 1,75 \cdot 3768 = 6594 \text{ кгмм} = 6,5 \text{ кгм}, \text{ что составляет } 63,8 \text{ Дж} = 0,063 \text{ кДж}.$$

Полная работа деформации и потребная энергия для получения типовой детали (рисунок 1) равна

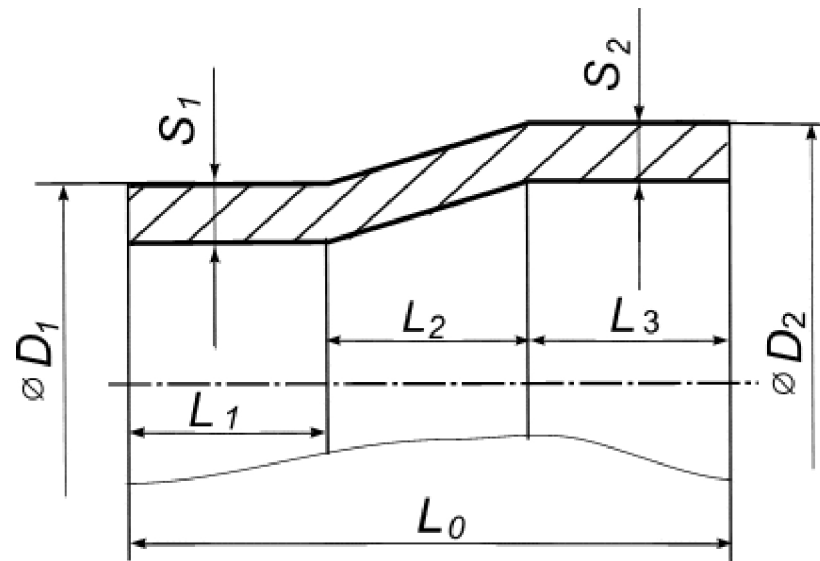
$$A = A_{ц} + A_k = 0,12 + 0,063 = 0,183 \text{ кДж}$$

Если для изготовления данной детали планируется использовать магнитно-импульсную технологию формообразования с к.п.д процесса равном 7 %, то можно рассчитать энергию заряда батареи конденсаторов

$$\text{МИУ} \quad W = \frac{A}{\eta} = \frac{0,183}{0,07} = 2,6 \text{ кДж}$$

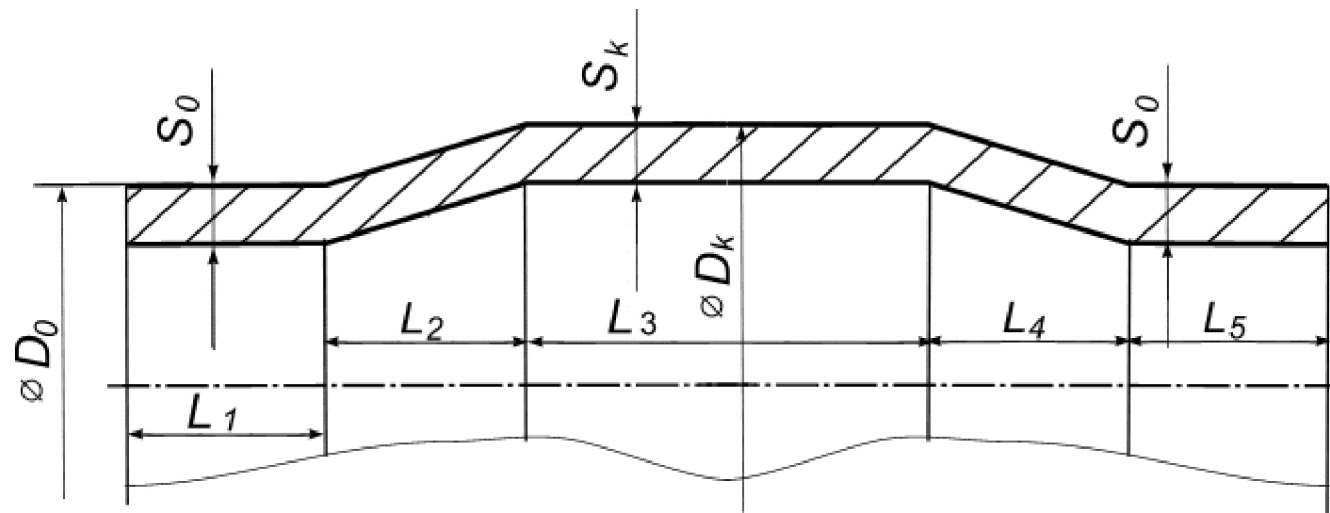
КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ
по определению потребной энергии динамического формообразования

Задание 1



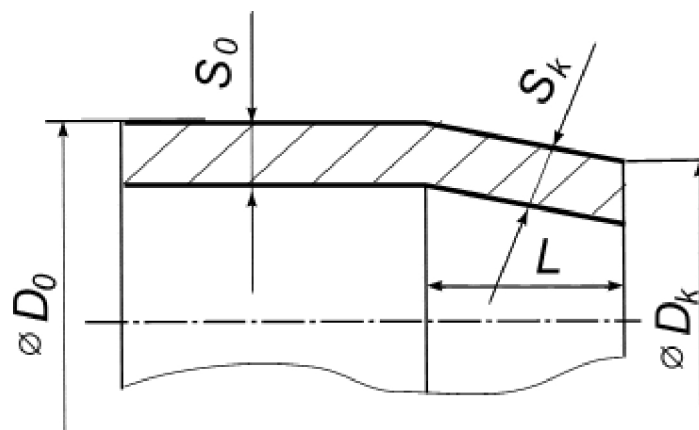
Вар	D_0	S_0	L_0	D_1	S_1	D_2	S_2	L_1	L_2	L_3	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	δ	$K_{\sigma_{\text{в}}}$	$K_{\sigma_{0,2}}$	K_{δ}	E
1	50	1,2	60	53	1,15	65	1,15	15	25	20	30	20	0,15	1,1	1,2	1,4	7000
2	60	1,5	60	62	1,48	80	1,45	15	25	20	40	30	0,1	1,1	1,2	1,3	7000
3	70	1,0	60	74	0,98	85	0,93	15	25	20	35	15	0,2	1,05	1,15	1,3	7000

Задание 2



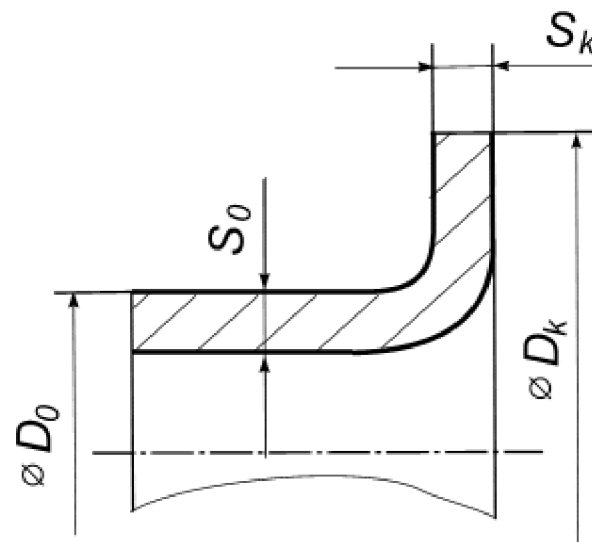
Вар	D_0	S_0	D_k	S_k	$L_1 = L_2$	$L_2 = L_4$	L_3	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	K_{σ_B}	$K_{\sigma_{0,2}}$	K_δ	E
1	50	1,0	60	0,92	20	30	30	10	5	0,3	1,1	1,2	1,3	7000
2	60	1,5	75	1,45	20	30	30	25	15	0,2	1,1	1,2	1,35	7000
3	65	2,0	85	1,87	20	30	30	35	20	0,15	1,1	1,25	1,4	7000

Задание 3



Вар	D_0	S_0	D_k	S_k	L	σ_e	$\sigma_{0,2}$	δ	K_{σ_e}	$K_{\sigma_{0,2}}$	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	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	δ	$K_{\sigma_{\text{в}}}$	$K_{\sigma_{0,2}}$	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. Скорость деформации, скорость деформирования. Расчетные формулы. Связь показателей между собой. Их значения для статических и динамических процессов ОМД.
2. Свойства металлов при высоких скоростях деформирования.
3. Причины повышения технологической пластичности металла при высокоскоростном деформировании.
4. Коэффициенты динамичности и их использование в процессах ОМД.
5. Волновые эффекты в процессах ОМД.
6. Упругие и пластические волны напряжений в металлах при высокоскоростном нагружении.
7. Скорость каких волн напряжений, упругих или пластических, больше и почему?
8. Пределы текучести, каких из двух металлов (Ст3 и Х18Н10Т) в большей степени изменяются с увеличением скорости деформации и почему?
9. Пластичность металла увеличивается или уменьшается с увеличением $\dot{\epsilon}$ и почему?
10. Перечислите известные вам методы высокоскоростного деформирования; приведите технологические схемы..
11. Классификация импульсных методов деформирования.
12. Преимущества и недостатки бассейновой штамповки взрывом.
13. Пресс-пушка. Конструкция. Область применения.
14. Быстрое и медленное горение. Определение и расчет давления при взрыве.
15. Технологические схемы взрывной обработки.
16. Сварка взрывом. Схема. Применение.
17. Примеры применения энергии взрыва в машиностроении (штамповка, упрочнение ...).
18. Технологическая схема, физика процесса огневого удаления заусенцев в закрытых полостях.
19. Физика процесса взрывной обработки.
20. Газообразные взрывчатые вещества.
21. Твердые взрывчатые вещества. Развиваемые давления.
22. Преимущества и недостатки штамповки в бронекамерах.
23. Физика процесса высоковольтного разряда в жидкости.
24. Параметры, определяющие эффективность электрогидравлического воздействия на заготовку.
25. Примеры использования электрогидравлического эффекта в технике.
26. Физика образования сборочных соединений при магнитно-импульсной обработке.

27. Основные блоки электрогидравлического оборудования (прессов).
28. Конструкции электродных систем при электрогидравлической штамповке.
29. Примеры использования энергии ИМП при выполнении формообразующих операций. Преимущества и недостатки.
30. Блок-схема магнитно-импульсной установки.
31. Какие параметры, свойства металла определяют эффективность магнитно-импульсной обработки?
32. Технологические схемы магнитно-импульсной резки.
33. Примеры использования энергии ИМП при выполнении сборочных операций. Преимущества и недостатки.
34. Конструкции индукторных систем.
35. Физика процесса магнитно-импульсного нагружения.
36. Скин-слой и его роль при магнитно-импульсной обработке.
37. Примеры использования энергии ИМП при выполнении разделительных операций. Преимущества и недостатки.
38. Технологические схемы магнитно-импульсной формовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Глущенко, В.А. Специальные виды штамповки. Часть 1. Штамповка эластичными средами [Текст]: учебное пособие / В.А.Глущенко.- Самара.: СГАУ, 2008.- 72 с.
2. Пихтовников, Р.В. Штамповка листовых металлов взрывом [Текст] / Р.В.Пихтовников, В.М.Завьялова.-М.:Машиностроение,1964.-174 с.
3. Чачин, В.Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов [Текст] / В.Н.Чачин.- Минск.:Наука и техника,1978.-184 с.
4. Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов [Текст] / И.В. Белый, С.М.Фертик, Хименко Л.Т.- Харьков.: Вища школа,1977.-168 с.
5. Высокоскоростное деформирование металлов [Текст] /Под ред.А.И.Шахназарова.- М.: Машиностроение,1966
6. Орленко, Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках [Текст] / Л.П.Орленко.-М.:Машиностроение,1964
7. Погодин-Алексеев, Г.И. Динамическая прочность и хрупкость металлов [Текст] / Г.И.Погодин-Алексеев.-М.:Машиностроение,1966.- 243 с.
8. 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.
9. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов [Текст] / С.И.Губкин.- М.:Металлургиздат, 1961.-417 с.
10. Хардин, В.Б. Особенности деформации металла при магнитно-импульсной штамповке [Текст] / В.Б.Хардин, А.Д.Комаров, Д.Н.Лысенко, В.А.Глущенко // Кузнечно-штамповочное производство.-1970.-№ 4.- С.
11. Райнхарт, Дж.С., Пирсон Дж. Взрывная обработка металлов [Текст]: [пер.с англ]/ Дж.С.Райнхарт, Дж.Пирсон.-М.:Мир,1966.-391 с
12. Гулый, Г.А., Малюшевский, П.П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах [Текст] / Г.А.Гулый, П.П.Малюшевский.-Киев: Наукова думка,1977.- 176 с.
13. Ракошиц, Г.С. Электроимпульсная штамповка [Текст] / Г.С. Ракошиц.- М.:Высшая школа, 1990.-191 с.
14. Бутузов, Е.А. Специальные виды штамповки [Текст] / Е.А.Бутузов.- М.:Высшая школа,1962.-206 с.
15. Баранов, Ю.В., Троицкий, О.А., Авраамов, Ю.С. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы [Текст] / Ю.В.Баранов, О.А.Троицкий, Ю.С.Авраамов.-М.:МГИУ,2011.-844 с.