

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

Г. М. ЛЕБЕДЁВ

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ  
ШТАМПОВКА ДЕТАЛЕЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Конспект лекций*

УДК 621.983.014.621.981

*Магнитно-импульсная штамповка деталей летательных аппаратов: Конспект лекций / Г. М. Лебедев; Куйб. авиац. ин-т. Куйбышев, 1988, 64 с.*

Отражены основные материалы по новому способу получения деталей летательных аппаратов с использованием энергии импульсных магнитных полей высокой напряженности. Описаны сущность и физические основы процессов, рассмотрены конструктивно-технологические особенности деталей, рекомендуемых к изготовлению данным способом штамповки; рассмотрены образцы технологической оснастки; даны методики разработки технологических процессов.

Табл. 4. Ил. 24. Библиогр.: 12 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета института

Научный редактор профессор В. А. Барвинок

Рецензенты: П. П. Саморуков, Н. М. Гражданкин

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях быстро развивающегося научно-технического прогресса изготовление новых конструкций летательных аппаратов зачастую требует разработки принципиально новых технологических процессов. Особенно это заметно в области обработки металлов давлением.

Здесь за последние два десятилетия получили развитие такие процессы, как штамповка заготовок эластичными средами, деформирование материала с наложением температурного поля и колебаний различного вида, импульсная обработка металлов, ротационная вытяжка, гидродинамическое выдавливание, получение деталей из труб и др. Все эти процессы имеют значительные технико-экономические преимущества по сравнению с традиционной технологией получения деталей, особенно в условиях мелкосерийного производства.

Высокими темпами в настоящее время в авиационной промышленности внедряются процессы штамповки заготовок с применением импульсных источников нагружения. Типичным представителем таких процессов является магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ).

Магнитно-импульсная обработка металлов — электрофизический метод импульсного пластического деформирования металлов и сплавов, основанный на непосредственном преобразовании электрической энергии в механическую работу.

Процесс магнитно-импульсного деформирования может быть осуществлен различными способами. Необходимые для осуществления деформации металлических заготовок усилия возникают в результате взаимодействия проводника (заготовки) с переменным магнитным полем, двух проводников с током, проводника с быстро уменьшающимся магнитным полем [1].

Наиболее широко распространен способ магнитно-импульсного деформирования, основанный на взаимодействии импульсного магнитного поля и вихревых токов, индуцируемых в заготовке при пересечении ее магнитными силовыми линиями.

Магнитно-импульсная штамповка относится к беспрессовым высокоскоростным процессам деформирования металлов. Она осуществляется при высоких скоростях и давлениях и значительно отличается от обычных методов штамповки на прессах по характеру приложения нагрузки, напряженно-деформированному состоянию, кинематике течения металла, а также по конструкции оснастки и оборудования средств. Она применяется в заготовительно-штамповочном производстве для выполнения разделительных и формообразующих операций листовой штамповки.

Основные особенности МНОМ:

а) давление импульсного магнитного поля, максимальная величина которого в промышленных условиях может достигать  $300...500 \text{ МПа/м}^2$ , переменна во времени, время давления очень мало (порядка  $10...200 \text{ мкс}$ );

б) скорость деформирования составляет  $5...300 \text{ м/с}$ ;

в) силы инерции оказывают существенное влияние на процессе деформирования;

г) воздействие на заготовку, как правило, осуществляется без какой-либо передаточной среды;

д) возможность ведения процесса в вакууме, в защитных средах;

е) возможность обработки труднодеформируемых малопластичных металлов и сплавов;

ж) возможность совмещения различных операций: вырубки, пробивки, отбортовки, калибровки, чеканки и др.;

з) универсальность оборудования, которому присущи небольшие размеры, масса и сравнительно низкие затраты наладку;

и) отсутствие сейсмичности;

к) широкая управляемость процессом и гибкость регулировки силового воздействия на обрабатываемую деталь;

л) легкая автоматизация и механизация процесса и возможность включения его в существующие технологические линии;

м) возможность сочетания силового и теплового воздействия при помощи основного рабочего тока и магнитного поля.

Процессы магнитно-импульсной штамповки имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с обычными методами листовой штамповки на прессах. К ним относятся:

а) возможность создания гибкой мобильной технологии штамповки без крупных уникальных прессов и сокращение до минимума сроков технологической подготовки производства;

б) высокая экономичность технологии за счет уменьшения количества и упрощения оснастки, а также значительного снижения амортизационных расходов;

в) возможность деформирования металла с большей интенсивностью, чем на прессах.

Таким образом, характерными особенностями данного метода деформирования являются возможности повышения эффективности штамповки за счет создания высоких давлений, магнитного поля на заготовку и скоростей деформирования, снижения объема ручных доводочных работ, упрощения и удешевления технологической оснастки, уменьшения капитальных затрат на оборудование, снижения величины производственных площадей.

При магнитно-импульсной штамповке получается высокая точность размеров и форм штампуемых деталей. Это достигается за счет создания избыточного давления на заготовку после прилегания ее к матрице. Такое давление способствует перераспределению напряжений и выравнивает их по высоте сечения заготовки. Таким образом создается сплошная пластическая зона по всему деформируемому объему металла заготовки, что приводит к уменьшению упругих деформаций и повышению стабильности формы детали.

Положительной особенностью МИОМ является также более равномерное распределение деформаций по толщине стенки штампуемой детали, что позволяет достичь больших, чем при статических методах нагружения, степеней деформации металла.

При МИОМ происходит волновой характер передачи энергии и распределения напряжений и деформаций. Возникновение высоких скоростей деформирования заготовок в процессе штамповки ведет, как правило, к повышению прочностных характеристик металла: предела прочности и предела текучести. С приложением импульсного силового воздействия металлы уплотняются, повышается поверхностная твердость, устраняются микротрещины, пористость, т. е. повышается качество металла.

Проведенные различными авторами исследования показали, что в материале деталей, изготовленных данным способом деформирования, наблюдается более низкий уровень внутренних напряжений, меньше возникают поверхностные дефекты, чем при обычной штамповке. Большие потенциальные возможности открывает метод магнитно-импульсной штамповки для разработки новых форм деталей летательных аппаратов из материалов с высокими показателями удельной прочности, в том числе с пониженной пластичностью, которые другими способами штамповки изготавливать либо затруднительно, либо вообще невозможно.

Метод МИОМ возник на базе ряда экспериментальных работ, которые проводились на протяжении последних пятидесяти лет физиками различных стран, по созданию мощных импульсных

магнитных полей в области развития атомной энергетики, квантовой электроники, физики твердого тела и т. д. Основы молодой науки — физики и техники магнитных полей — заложил в 1923—27 гг. академик П. Л. Капица, впервые получивший магнитное поле напряженностью  $0,5 \cdot 10^6$  Э [2].

Открытые публикации об использовании энергии импульсного магнитного поля (ИМП) для обработки металлов давлением в производственных условиях и о создании первой модели установки «Маглеформ» фирмы «Dynamics Corp» (США) появились в начале 60-х годов [3]. В последующие годы метод МНОМ стал успешно развиваться как в нашей стране, так и за рубежом: появились новые конструкции машин, начались поиски по разработке новых технологических процессов и по совершенствованию ранее известных. Поисковые исследования по расширению возможностей применения энергии ИМП в технологических целях были направлены применительно к операциям: листовой и объемной штамповке деталей из порошковых материалов, труднодеформируемых обычными способами; сборке герметичных и неразъемных соединений; сварке давлением различных металлов и др.

В связи с успешными работами, проведенными в ряде научно-исследовательских организаций нашей страны по изучению и исследованию метода МНОМ, процессы магнитно-импульсной штамповки внедрены и успешно внедряются на передовых предприятиях машиностроения и производства летательных аппаратов.

# 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

## 1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДНИКАХ С ТОКОМ

Магнитно-импульсное деформирование металлов основано на использовании электромагнитных явлений, возникающих в проводниках с током [4]. При протекании электрического тока по проводнику вокруг него возникает магнитное поле. Интенсивность магнитного поля в каждой точке характеризуется магнитной индукцией  $B$ . В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа всякий элемент проводника длиной  $dl$  с током  $I$  (рис. 1.1) создает в точке  $A$  на расстоянии  $r_r$  от элемента магнитное поле с индукцией

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin\alpha}{r_r^2} \quad (1.1)$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость вещества;

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

Магнитная индукция — векторная величина, направление вектора определяется по правилу буравчика. Магнитная индук-

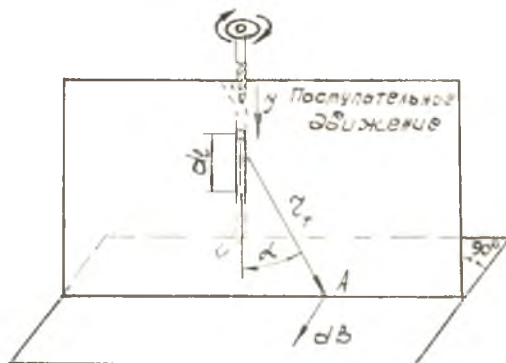


Рис. 1.1. Элемент проводника с током

ция характеризуется плотностью линий магнитной индукции и напряженностью. Плотность линий магнитной индукции выражается магнитным потоком

$$\bar{\Phi} = \bar{B} s_n, \quad (1.2)$$

где  $s_n$  — площадка, перпендикулярная вектору магнитной индукции и пронизываемая магнитным полем.

Напряженность магнитного поля  $\bar{H}$  в однородной среде не зависит от магнитных свойств вещества, в котором создается поле, но учитывает влияние величины тока и формы проводников на интенсивность магнитного поля в данной точке. Магнитная индукция и напряженность поля связаны между собой соотношением

$$\bar{B} = \mu \mu_0 \bar{H}. \quad (1.3)$$

Напряженность магнитного поля  $\bar{H}$  — векторная величина. Направление вектора напряженности магнитного поля в анизотропных средах совпадает с направлением магнитного поля в данной точке. Зависимость между напряженностью магнитного поля и током устанавливается законом полного тока, в соответствии с которым намагничивающая сила  $F_H$  вдоль поперечного контура  $l_1$  равна полному току  $\Sigma I$  (алгебраической сумме токов), проходящему сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$F_H = \Sigma I \quad (1.4)$$

или

$$H l_1 = \Sigma I. \quad (1.5)$$

Во всех точках, удаленных от оси сечения прямолинейного проводника радиуса  $a$  с током  $I$  на одинаковое расстояние  $r_T$ , напряженность поля в силу симметрии одинакова по величине (рис. 1.2). Так как  $\Sigma I = I$ , а  $l_1 = 2\pi r_T$ , то напряженность магнитного поля в точке  $A$  (рис. 1.2,а)

$$H = \frac{I}{2\pi r_T}. \quad (1.6)$$

Напряженность магнитного поля внутри проводника (рис. 1.2,б), когда  $r_T < a$  ( $2a$  — диаметр сечения проводника), определяется по формуле

$$H = \frac{I}{2\pi a^2} \cdot r_T. \quad (1.7)$$

В центре сечения проводника при  $r_T = 0$  напряженность поля  $H = 0$ . Напряженность поля на поверхности проводника ( $r_T = a$ ) определяется по формуле



$$H = \frac{I}{2\pi a} \quad (1.8)$$

и будет максимальной для данного магнитного поля.

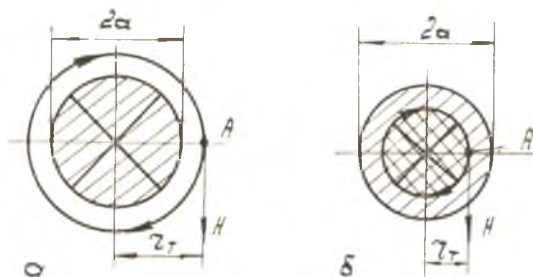


Рис. 1.2. Магнитное поле прямолинейного проводника с током: *a* — точка *A* вне проводника; *b* — точка *A* внутри проводника

Индукция в любой точке магнитного поля, образуемого токами, проходящими по двум проводникам, может быть определена геометрическим сложением векторов магнитной индукции в данной точке:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2. \quad (1.9)$$

Магнитное поле, окружающее два параллельных проводника с равными токами, показано при одинаковом направлении токов на рис. 1.3,а, а при встречном направлении токов — на рис. 1.3,б.

Прямолинейный проводник длиной  $l_1$  с проходящим током  $I$ , помещенный в магнитное поле, воспринимает воздействие электромагнитной силы, определяемой по формуле  $F = I l_1 B \sin \alpha$ . Электромагнитная сила имеет максимальное значение, если на-

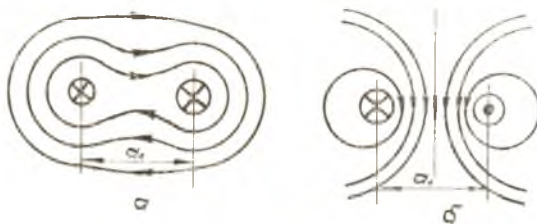


Рис. 1.3. Магнитное поле двух параллельных проводников с током: *a* — при одинаковом направлении токов; *b* — при встречном направлении токов

правление тока и вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  взаимно перпендикулярны (рис. 1.4), тогда

$$F = I l_1 B. \quad (1.10)$$



Рис. 1.4. Прямой проводник с током в магнитном поле: направления тока и вектора магнитной индукции взаимно перпендикулярны

При сближении двух проводников с током их магнитные поля взаимодействуют, что приводит к силовому воздействию одного проводника на другой (рис. 1.5). Направление сил определяется по правилу левой руки. Параллельные проводники с одинаковым направлением тока притягиваются, а с противоположным отталкиваются. Силы взаимодействия определяются по формуле

$$F_1 = F_2 = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2 \pi a_1} l_1, \quad (1.11)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  — токи в проводниках, А;  
 $a_1$  — расстояние между проводниками, м;  
 $l_1$  — длина проводника, м.

Для осуществления магнитной формовки листовой заготовки (проводника), помещенной параллельно матрице, с использованием эффекта протяжения необходимо пропускать через них ток

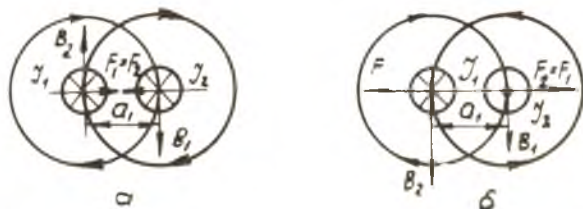


Рис. 1.5. Взаимодействие двух проводников с токами: а — при одинаковом направлении токов, б — при встречном направлении токов

одного направления силой  $10^5 \dots 10^{10}$  А и создавать электромеханические силы взаимодействия  $F = 200 \dots 300$  МПа. Получить такие токи помогает явление наведения тока в проводнике при изменении магнитного поля, т. е. с помощью электромагнитной индукции.

## 1.2. ИМПУЛЬСНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКОЙ

В замкнутом проводнике — одном витке, помещенном в переменное магнитное поле, созданное электрическим током, протекающим по какой-либо цепи, в соответствии с законами электромагнитной индукции возникает электрический ток. Этот ток

появляется в результате изменения во времени магнитного потока, сцепленного с этим витком. Аналогичное явление наблюдается в плоской или трубчатой проводящей заготовке, помещенной в переменное магнитное поле. В ней возникнут переменные вихревые токи. При протекании переменного электрического тока по виткам длинной катушки создается переменное магнитное поле, которое наводит в электропроводной плоской или трубчатой заготовке (рис. 1.6), помещенной внутри катушки, вихревые токи. Вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости в катушке и заготовке (рис. 1.6) будет наблюдаться явление неравномерного распределе-

ния тока и магнитного поля. При резком появлении поверхностного эффекта — скин-эффекта, т. е. при больших толщинах шины проводника катушки или при большой частоте тока, уменьшение плотности тока от поверхности к оси сечения шины проводника происходит по закону

$$\delta_x = \delta_s e^{-\frac{x}{\delta}}, \quad (1.12)$$

где  $\delta_x$  — среднеквадратичное значение плотности тока на расстоянии  $x$  от поверхности проводника, А/м<sup>2</sup>;

$\delta_s$  — среднеквадратичное значение плотности тока на поверхности проводника, А/м<sup>2</sup>;

$\Delta$  — расстояние от поверхности проводника по направлению к оси сечения шины, на котором плотность тока

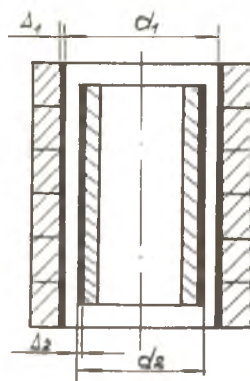


Рис. 1.6. Проводящая труба в переменном магнитном поле

убывает в  $\epsilon = 2,71$  раза по сравнению с плотностью тока на поверхности.

Величина  $\Delta$  условно называется глубиной проникновения тока, измеряется в метрах и определяется по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \mu_0 \gamma}} \quad (1.13)$$

где  $\omega$  — круговая частота колебаний тока  $\omega = 2\pi f$ ;

$f$  — частота тока;

$\gamma$  — удельная электропроводность материала проводника,

$$\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}.$$

В соответствии с законом (1.12) плотность тока будет падать в стенке трубчатой заготовки от наружной поверхности к центру цилиндра по толщине — глубина проникновения  $\Delta_2$ , а у катушки — от рабочей поверхности к оси сечения шины — глубина проникновения  $\Delta_1$  (рис. 1.6). Уменьшение плотности токов и магнитного поля будет тем сильнее, чем выше частота изменения во времени магнитного поля, т. е. чем выше частота  $f$  тока, проходящего по виткам катушки. В то же время падение плотности тока в стенках плоских и трубчатых заготовок при одинаковой частоте тока будет сильнее в заготовках из материала с более высокой электропроводностью. По закону Э. Х. Ленца направление наведенных токов в трубчатой заготовке противоположно направлению тока в катушке. В результате взаимодействия токов встречного направления образуются отталкивающие электромеханические силы, которые с одинаковой силой воздействуют как на заготовку, так и на катушку. Если прочность катушки значительно выше прочности заготовки, то электромеханические силы деформируют заготовку (рис. 1.6). Переменное магнитное поле в процессе воздействия на электропроводную заготовку как бы диффундирует в стенку заготовки по закону, аналогичному (1.12), и в связи с этим возникающие электромеханические силы носят объемный характер. Значение электромеханических сил определяется выражением

$$F = \frac{1}{10} [JH],$$

где  $\vec{J}$  — вектор плотности наведенного в заготовке тока;

$\vec{H}$  — вектор напряженности магнитного поля.

Напряженность магнитного поля пропорциональна плотности тока, поэтому электромеханические силы растут как квадрат напряженности магнитного поля. Предельное значение давления  $P_{\max}$  в МПа, оказываемого магнитным полем на заготовку, определяется

$$P_{\max} = \frac{B^2}{8\pi} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \quad \text{или} \quad P_{\max} = \mu\mu_0 \frac{I^2}{2}, \quad (1.14)$$

где  $\mu\mu_0 H = B$ .

Давление магнитного поля, способное деформировать металл, должно превышать предел упругости металла. Это условие выполнимо только при наличии напряженности магнитного поля свыше  $10^5$  Э. Например, при  $B = 10^6$  Г максимальное давление на металлическую стенку заготовки, определяемое по формуле (1.14), составляет величину  $P_{\max} = 400$  МПА (40 кгс/мм<sup>2</sup>). На практике давление  $P$  на заготовку никогда не достигает предельных значений по (1.14).

### 1.3. СХЕМА ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

Импульсные токи, достаточные для МИОМ плотности, могут быть получены разрядом батарей конденсаторов через катушку-индуктор с малым сопротивлением. Для создания сильных импульсных магнитных полей и токов в магнитно-импульсных установках применяются специальные высоковольтные импульсные конденсаторы [2]. Рабочим инструментом служит катушка-индуктор. Принципиальная электрическая схема установки для магнитно-импульсной штамповки и технологического блока на примере формовки рифтов на раздачу на трубчатой заготовке показана на рис. 1.7. От сети переменного тока через трансформатор 1 и выпрямитель 2 осуществляется зарядка постоянным током повышенного напряжения емкостного накопителя (батарей конденсаторов) 3 до напряжения, заданного регулятором заволашемой энергии 5. При достижении заданного уровня энергии на электрод поджига трехэлектродного разрядника 4

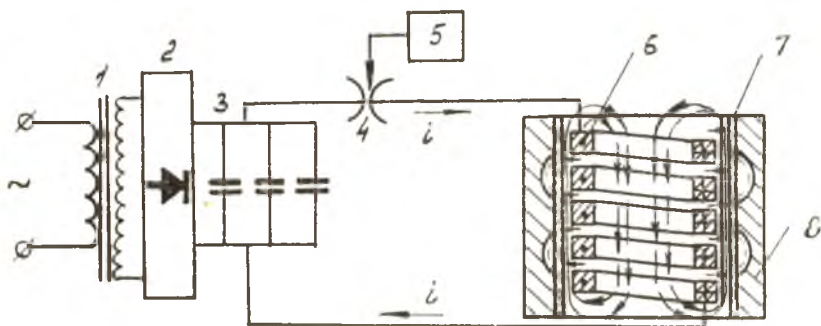


Рис. 1.7. Принципиальная электрическая схема установки для магнитно-импульсной штамповки

подается высоковольтный поджигающий импульс, который ионизирует пространство между электродами разрядника и вызывает электрический пробой воздушного промежутка между ними. При пробое разрядника запасенная в конденсаторах энергия в виде импульса тока проходит через спираль индуктора 6, создает вокруг нее мощное импульсное магнитное поле, индуктирующее в электропроводной заготовке 7, помещенной вблизи индуктора, вихревые токи (токи Фуко). Напряжение этих токов пропорционально скорости изменения поля, а направление противоположно направлению разрядного тока в индукторе. Взаимодействие токов индуктора с токами в заготовке вызывает возникновение импульсных электромеханических сил отталкивания. Эти силы направлены по нормали к поверхности заготовки и производят деформирование заготовки по матрице 8. Сила, действующая на единицу объема проводящей заготовки, находящейся в магнитном поле, описывается уравнением [5]

$$\frac{dF}{dV} = \bar{i}\bar{B},$$

где  $\bar{i}$  — вектор плотности тока, индуктированного в заготовке;  
 $\bar{B}$  — вектор магнитной индукции;  
 $V$  — объем электропроводной заготовки.

Сила  $F$ , действующая на заготовку, а следовательно и давление  $P$ , оказываемое на нее магнитным полем, возрастает с увеличением плотности тока, которая тем больше, чем выше электропроводность заготовки. Поэтому металлы и сплавы с высокой электропроводностью (золото, серебро, медь, алюминий и его сплавы, малоуглеродистые стали и др.) значительно лучше подвергаются магнитно-импульсной обработке, чем материалы с низкой электропроводностью.

При магнитно-импульсной штамповке металлов роль одной части инструмента-пуансона или матрицы выполняет магнитное поле, образующееся вокруг индуктора. Давление на деформируемую металлическую заготовку создается непосредственным воздействием импульсного магнитного поля без участия промежуточных твердых, жидких или газообразных тел. Механические силы, действующие на заготовку при МИОМ, имеют динамический или импульсный характер с длительностью, исчисляемой тысячными и даже миллионными долями секунды, вследствие чего имеет место концентрация энергии огромной мощности и достигаются в промышленных условиях высокие давления до 500 МПа (50 кгс/мм<sup>2</sup>) и выше. Заготовка под воздействием магнитного поля деформируется и перемещается с большой скоростью. К моменту контакта с пуансоном или матрицей скорость заготовки достигает порядка 5...300 м/с, а в отдельных случаях и более. Силы инерции играют большую роль. Они на

первом этапе деформирования препятствуют движению заготовки, а на втором — способствуют ему, влияют на напряженно-деформированное состояние материала заготовки.

#### 1.4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКИ

Электрическая схема магнитно-импульсной установки (МИУ) (рис. 1.7) представляет собой нелинейный контур разряда конденсаторной батареи, так как параметры индуктора — сопротивление  $R_{\text{и}}$  и индуктивность  $L_{\text{и}}$  изменяются в процессе разряда.

Ток, протекающий в цепи индуктора при разряде конденсаторной батареи, приближенно выражается уравнением затухающего гармонического колебания:

$$i = \frac{U}{L \omega} e^{-\frac{R}{2L} t} \sin \omega t, \quad (1.15)$$

где  $U$  — рабочее напряжение, до которого заряжена конденсаторная батарея, В;

$L$  — индуктивность контура разряда, Гн;

$e$  — основание натурального логарифма;

$R$  — активное сопротивление контура разряда, Ом;

$t$  — время разряда, с.

Круговая частота колебаний разрядного тока

$$\omega = 2 \pi j = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}, \quad (1.16)$$

где  $j$  — частота разрядного тока, Гц;

$C$  — емкость конденсаторной батареи, Ф.

Напряженность магнитного поля в любой точке окружающего пространства спирали индуктора пропорциональна току разряда. В связи с этим

$$P = K \frac{U^2}{L^2 \omega^2} e^{-Rt/L} \sin^2 \omega t, \quad (1.17)$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий соотношение геометрических параметров системы индуктор — заготовка.

Характер изменения тока цепи разряда  $i$  установки и давления магнитного поля  $P$  в зазоре между индуктором и заготовкой во времени представлен на рис. 1.8. Давление ИМП переменного во времени и представляет затухающую квадратичную синусоиду. Из уравнения (1.15) определяется значение первого максимума тока, которому соответствует наибольшее значение напряженности магнитного поля:

$$i_{\max} = \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \exp\left[-\frac{R}{2L\omega} \operatorname{arctg} \frac{2L\omega}{R}\right]. \quad (1.18)$$

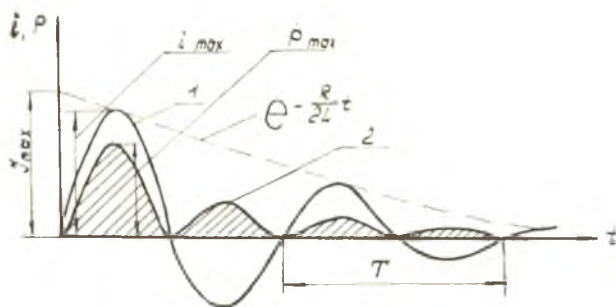


Рис. 1.8. Кривые изменения тока разряда (1) и давления магнитного поля (2) на заготовку во времени

Для получения достаточно больших давлений магнитного поля необходимы импульсы тока с амплитудой, измеряемой сотнями тысяч ампер. Ток разряда имеет колебательный характер по (1.15) только в том случае, если потери в контуре цепи разряда установки малы, т. е. если

$$R_{\text{вн}} < 2 \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Это соотношение на практике всегда выполняется с большим запасом. Активные потери  $R_{\text{вн}}$  и внутренние индуктивности разрядного контура установки  $L_{\text{вн}}$  складываются из элементов:

$$R_{\text{вн}} = R_{\text{кт}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{к}}, \quad (1.19)$$

$$L_{\text{вн}} = L_{\text{кт}} + L_{\text{ш}} + L_{\text{к}}, \quad (1.20)$$

где  $R_{\text{кт}}, L_{\text{кт}}$  — сопротивление и индуктивность коммутатора (трехэлектродный разрядник);

$R_{\text{ш}}, L_{\text{ш}}$  — сопротивление и индуктивность подводящих шин;

$R_{\text{к}}, L_{\text{к}}$  — сопротивление и индуктивность конденсаторной батареи.

Для обеспечения эффективной работы МИУ необходимо, чтобы активное сопротивление контура разряда  $R_{\text{вн}}$  было как можно меньше. Разрядный импульс имеет синусоидальную форму с периодом  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ . С уменьшением индуктивности разрядного контура установки  $L_{\text{вн}}$  уменьшается период разрядного тока  $T$ , что позволяет при заданном уровне энергии получать более высокие амплитуды разрядного тока  $i_{\text{max}}$ .

#### 1.5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И КПД ПРОЦЕССА МИОМ

Работа формообразования при МИОМ производится энергией, накопленной в заряженной конденсаторной батарее уста-



новки. Эта энергия определяется в джоулях из выражения

$$E_э = 1/2 CU^2, \quad (1.21)$$

МИУ характеризуется прежде всего максимальной энергией, которая может быть получена в накопителе. Энергия накопителя еще не определяет полностью работоспособность установки. Запасенная электрическая энергия  $E_э$  в МИУ расходуется на образование магнитного поля индуктора, а также на образование паразитных магнитных полей и активные потери в контуре разрядной цепи установки [6], т. е.

$$E_э = E_{II} + E_{пот},$$

что снижает КПД процесса.

Электрическая энергия, преобразуемая в системе индуктор-заготовка в магнитное поле, определяется как

$$E_{II} = \frac{L_{II} i^2}{2},$$

расходуется на механическую работу деформирования заготовки, на ее нагревание и частично теряется.

При МИОМ основное формообразующее действие магнитного поля на заготовку осуществляется на протяжении первого полупериода тока разряда и примерно пропорционально квадрату амплитуды тока  $i_{max}$ . Из уравнения (1.18), полагая  $R=0$ , следует, что

$$i_{max}^2 = \frac{CU^2}{L} = \frac{2E}{L_{II} + L_{вн}},$$

где  $L_{II}$  — индуктивность индуктора с заготовкой.

Для получения высокой эффективности установки МИОМ необходимо, чтобы по возможности удовлетворялось неравенство

$$L_{п1} = L_{кг} + L_{ш} + L_{к} \ll L_{II} \quad (1.22)$$

Уменьшение внутренней индуктивности установки  $L_{вн}$  способствует повышению энергии магнитного поля индуктора. Индуктивность индуктора  $L_{II}$  с учетом влияния заготовки определяется рядом условий, связанных преимущественно с характером технологической операции, для выполнения которой он предназначен. Она может принимать различные значения в зависимости от типа индуктора, подключенного к установке.

Бесполезно теряется часть энергии, расходуемая на образование паразитных магнитных полей и на активные потери в элементах установки:

$$E_{пот} = \frac{L_{вн} i^2}{2} + \int_0^{T/4} R_{вн} i^2 dt.$$

Эти потери снижают КПД процесса обработки.

Эффективность МИУ повышается в прямолинейной зависимости с уменьшением внутренней индуктивности (1.20) и активного сопротивления цепи разряда (1.19). С целью снижения внутренней индуктивности МИУ для емкостного накопителя необходимо применять специальные высоковольтные малоиндуктивные конденсаторы, обладающие достаточно малой собственной индуктивностью. Токи, индуктированные магнитным полем в заготовке, наряду с механическими силами вызывают ее нагрев. Нагрев заготовки зависит от глубины проникновения поля в металл и сосредотачивается в тонком поверхностном слое заготовки за счет скин-эффекта. Общая температура заготовки после формирования одним импульсом не превышает 150...200°C.

Глубина проникновения магнитного поля в металлы в стенку детали по (1.13) может быть определена для МИОМ:

$$\Delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \mu_0 f}} \quad (1.23)$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление металла, Ом·м.

Повышенные температуры стенки заготовки за время импульса может быть оценено по формуле

$$\Delta T^{\circ}\text{C} = \frac{R I_{\max}^2 t_i}{2V C_v \nu} \quad (1.24)$$

где  $V$  — объем заготовки, определяемый эффективным сечением прохождения разрядного тока и зависящий от глубины проникновения магнитного поля, м<sup>3</sup>;

$C_v$  — удельная теплоемкость материала заготовки, Дж/град·кг;

$\nu$  — плотность материала заготовки, кг/м<sup>3</sup>.

Для уменьшения затрат энергии на нагрев заготовки время импульса  $t_i$  и частота  $f$  выбираются так, чтобы глубина проникновения  $\Delta$  была мала по сравнению с толщиной

стенки заготовки  $s$ . Нагрев заготовки возрастает, если глубина проникновения магнитного поля больше толщины заготовки  $\Delta > s$ . Давление, действующее на заготовку, ослабевает, в особенности, когда под заготовкой находится металлическая матрица, и определяется в МПа (рис. 1.9).

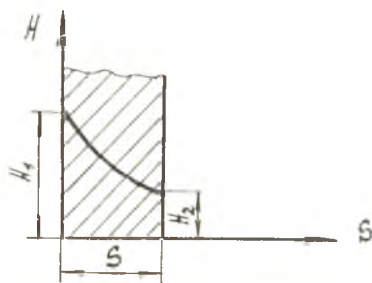


Рис. 1.9. Изменение напряженности магнитного поля при просачивании по толщине заготовки

$$P = \mu \mu_0 \frac{(H_1^2 - H_2^2)}{2}, \quad (1.25)$$

где  $H_1$  — напряженность на поверхности заготовки со стороны индуктора;

$H_2$  — напряженность на поверхности заготовки со стороны матрицы.

При обработке заготовки на металлической матрице или оправке проникновение (просачивание) магнитного поля за стенку заготовки недопустимо, так как это приводит к недоштамповке из-за явления «магнитной подушки». Для предотвращения образования «магнитной подушки» и создаваемого ею противодействия необходимо, чтобы длительность импульса магнитного поля не превышала времени деформирования заготовки, частота колебаний тока разряда  $f$  была достаточно велика и глубина проникновения магнитного поля (1.23) была не больше толщины заготовки.

Из уравнения частоты разрядного тока, полученного из (1.16), если пренебречь  $R$ ,

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{U}{2\pi\sqrt{2EL}}$$

следует, что уменьшение внутренней индуктивности МНУ  $L_{\text{вн}}$  (1.22) очень важно не только для повышения энергии магнитного поля индуктора, но и для получения достаточно высокой частоты колебаний тока разряда  $f$  и соответственно для уменьшения глубины проникновения магнитного поля в стенку заготовки. Выбор частоты разрядного тока  $f$  при МИОМ имеет огромное значение. Она должна быть тем больше, чем меньше толщина обрабатываемой заготовки  $s$ .

Важной характеристикой МИОМ является степень эффективности использования накопленной энергии для деформирования, т. е. КПД процесса. Учесть все потери аналитически весьма сложно, поэтому КПД процесса в целом определяется экспериментальным путем как отношение работы пластической деформации к накопленной энергии:

$$\eta = \frac{A}{E_s} 100\%. \quad (1.26)$$

Здесь учитываются все потери, о которых говорилось выше.

В зависимости от характеристики импульсного магнитного поля (распределение его в пространстве и во времени), от физических свойств материала, геометрических размеров заготовки, вида и характера технологической операции изменяется силовое и тепловое поле в заготовке и, следовательно, протекающие рабочие процессы магнитно-импульсного формообразования

и КПД. По данным отечественных и зарубежных исследователей КПД для процессов МИОМ колеблется в пределах 2...30%.

В практике общая энергия силового импульсного магнитного поля оценивается энергией емкостного накопителя установки с учетом КПД процесса.

В производстве применяются МИУ с различной энергоемкостью: 6; 10; 20, 40, 50; 100 кДж и др. Наиболее широко распространены МИУ-20 и МИУ-50, которые имеют энергоемкость соответственно 20 и 50 кДж.

## *2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКОЙ*

### *2.1. ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ ИМП В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ И СХЕМЫ ОБРАБОТКИ*

Энергия ИМП в настоящее время находит широкое применение в технологических целях в самолетостроении и других отраслях машиностроения. С помощью МИОМ можно выполнять практически любые операции листовой штамповки, а также некоторые операции объемной штамповки из порошковых материалов, можно осуществлять сборку и сварку деталей, на прессовку металлических деталей на хрупкие неметаллические изделия, производить клепку и прессовать порошки (табл. 2.1).

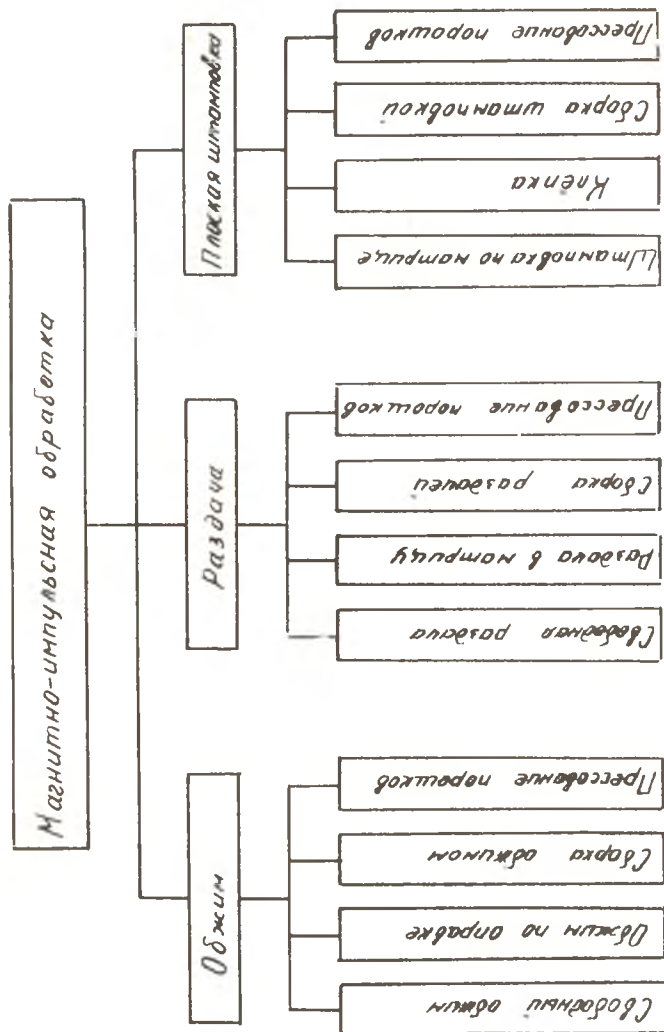
Перспективен этот метод металлообработки и для силовой интенсификации процессов штамповки деталей из листа, тонкостенных труб и профилей, а также для упрочнения металла.

Всего же в настоящее время освоено более 150 видов технологических операций, выполняемых с использованием энергии ИМП. Для осуществления технологических операций широко используется способ деформирования, основанный на взаимодействии проводника с переменным магнитным полем индуктора [1, 5].

При разработке схем для выполнения операций, осуществляемых магнитно-импульсной обработкой, в основу положены с учетом специфики процессов форма заготовки (труба или лист), характер деформации (сжатие или растяжение) имеющейся при штамповке трубчатой детали. Как правило, характер деформации определяется способом расположения индуктора относительно заготовки: снаружи — сжатие, внутри ее — растяжение.

Таблица 21

Технологические процессы, осуществляемые с помощью энергии ИММ



Все технологические процессы, выполняемые с помощью энергии импульсного магнитного поля, по форме заготовки, типу применяемого индуктора и оснастки можно разбить на три основные технологические схемы обработки: обжим, раздачу и плоскую (листовую) штамповку (рис. 2.1).

По первой и второй схемам ведется обработка деталей из трубчатых заготовок, по третьей — штамповка листовых заготовок и трубчатых изделий большого диаметра (пробивка отверстий, отбортовка, правка и др.).

Обжим (рис. 2.1,а) осуществляется с помощью спирального цилиндрического или конического индуктора, устанавливаемого снаружи обрабатываемой заготовки. Внутрь заготовки вводится матрица или оправка, имеющая форму штампуемой детали.

Штамповка трубчатых заготовок по схеме «раздача» выполняется с помощью цилиндрического или конического индуктора, вводимого внутрь обрабатываемой заготовки (рис. 2.1,б). Снаружи заготовки располагается матрица, имеющая форму штампуемой детали.

Плоская (листовая) штамповка выполняется с помощью плоского спирального индуктора различной формы (рис. 2.1,в). Обрабатываемая листовая заготовка размещается между индуктором и жесткой матрицей с рабочей поверхностью, имеющей форму штампуемой детали.

Как уже отмечалось, при разряде электрической энергии, предварительно накопленной в батарее конденсаторов установки, на индуктор (рис. 1.7) вокруг его спирали образуется мощный импульс переменного магнитного поля, который возбуждает в помещенной внутри этого поля заготовке вихревые токи. Вихревые токи протекают во встречном направлении разрядному току в индукторе (рис. 2.1,а,б,в) и в течение короткого промежутка времени экранизируют поле на поверхности заготовки.

Магнитное поле, заключенное между индуктором 1 и заготовкой 2, оказывает давление как на заготовку, так и на индуктор. Если величина этого давления достаточно велика, то заготовка пластически деформируется, перемещаясь от индуктора под действием сил отталкивания.

На пути перемещения заготовки 1 устанавливается технологический инструмент 3 (пуансон, матрица, оправка и т. п.), с помощью которого заготовке придается необходимая форма.

При обжиге (рис. 2.1,а) давление магнитного поля сжимает обрабатываемую трубчатую заготовку и стремится растянуть индуктор, а при раздаче (рис. 2.1,б) давление магнитного поля стремится раздуть заготовку и сжать индуктор. В связи с этим индуктор должен изготавливаться прочным и массивным, чтобы противостоять давлению поля и выдержать большое количество

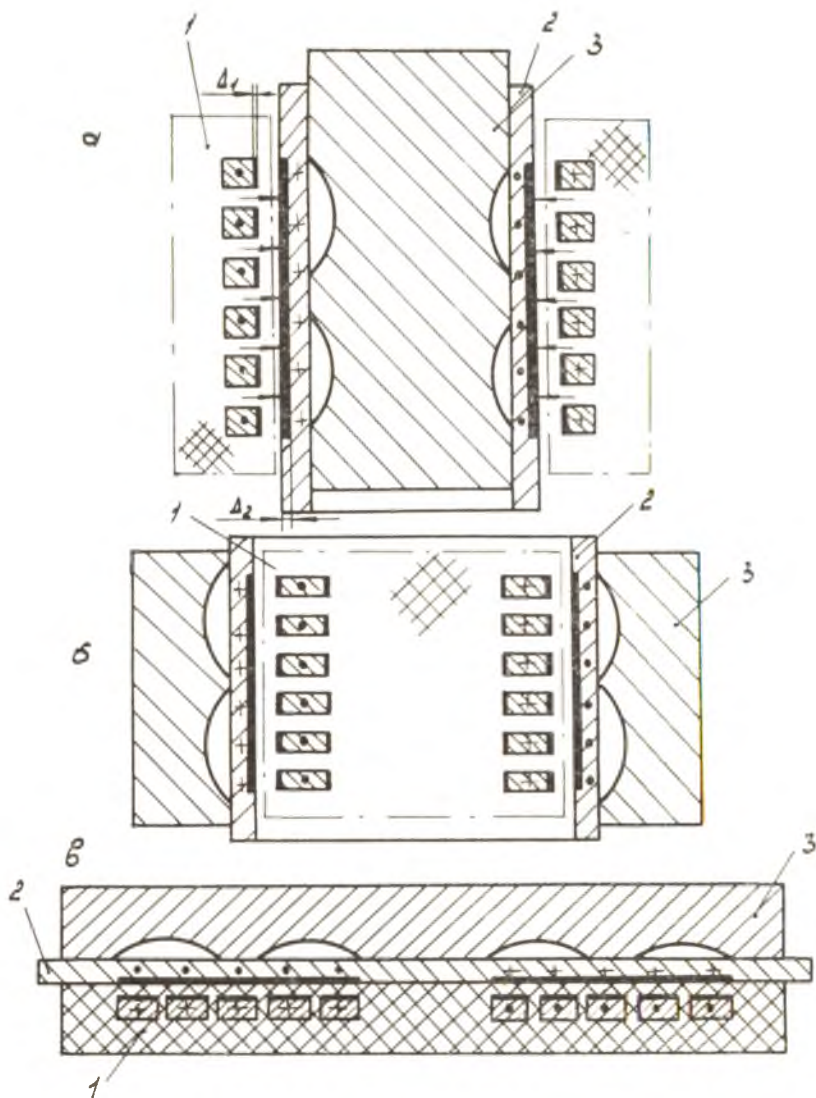


Рис. 2.1. Основные технологические схемы МПОМ: а — обжим трубчатой заготовки, б — раздача трубчатой заготовки, в — штамповка плоской заготовки, 1 — индуктор, 2 — заготовка, 3 — матрица (оправка)

разрядов без разрушения. Однако могут применяться и простые, более дешевые (разовые) индукторы, разрушающиеся в процессе разряда.

Все три рассмотренные схемы предусматривают деформирование заготовки без ее электрического контакта с индуктором, поэтому эти схемы называются схемами бесконтактного деформирования.

Второй, контактный способ деформирования металлических заготовок (рис. 2.2) основан на взаимодействии двух токоведущих проводников: проводники отталкиваются друг от друга, если по ним протекают токи во встречном направлении, и притягиваются, если токи протекают параллельно в одном направлении [5].

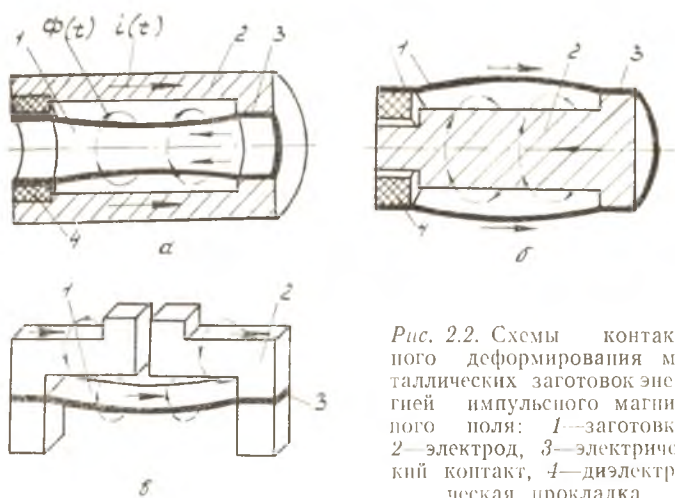


Рис. 2.2. Схемы контактного деформирования металлических заготовок энергией импульсного магнитного поля: 1—заготовка, 2—электрод, 3—электрический контакт, 4—диэлектрическая прокладка

На рис. 2.2,а приведена схема обжима трубчатой заготовки, основанная на встречном пропускании тока разряда через обрабатываемую заготовку и специальный трубчатый электрод, с помощью которого магнитное поле «запирается» в зазоре между ними. С одной стороны заготовка и электрод имеют общий электрический контакт, а свободные концы друг от друга изолированы диэлектрической прокладкой и включены в разрядную цепь установки.

На рис. 2.2,б дана схема раздачи трубчатой заготовки с помощью цилиндрического электрода, помещенного в заготовку и имеющего с ней электрический контакт.

Схема деформирования плоских листовых заготовок контактным способом приведена на рис. 2.2,в. Концы заготовки через



электрический контакт подсоединены к электродам, включенным в разрядную цепь установки.

При параллельном пропускании тока разряда через заготовку и электрод в одном направлении магнитное поле не удастся надежно экранировать, вследствие чего большая часть энергии теряется, рассеиваясь в пространстве, резко снижается КПД процесса. Поэтому контактный способ деформирования силами притяжения тока не нашел заметного практического применения.

Интересным является третий способ деформирования, основанный на взаимодействии проводника с быстро исчезающим магнитным полем индуктора. Исходную заготовку помещают в медленно нарастающее магнитное поле, которое наводит в заготовке вихревые токи. Ввиду низкой скорости изменения поля величина вихревых токов недостаточна, чтобы препятствовать проникновению поля через заготовку. Поэтому давление магнитного поля, отталкивающее заготовку от индуктора, в период нарастания поля незначительно, и заготовка не деформируется. После того как напряженность поля за заготовкой достигла необходимого уровня, напряженность в зазоре между индуктором и заготовкой быстро уменьшается. Быстро уменьшающееся при этом поле наводит в заготовке сильные вихревые токи, величина которых пропорциональна скорости уменьшения поля и достаточна, чтобы экранировать поле внутри заготовки. В результате взаимодействия вихревых токов в заготовке с полем, проникшим за заготовку, возникают электродинамические силы, направленные к индуктору и деформирующие заготовку в том же направлении.

В связи с этим при деформировании металла силами притяжения индуктор располагают снаружи, а при обжиме — внутри обрабатываемой заготовки. Быстрое уменьшение напряженности магнитного поля достигается с помощью специальных устройств, например плавких предохранителей или дополнительного конденсатора, имеющего противоположную полярность по отношению к основному конденсатору, меньшую емкость и более высокое зарядное напряжение [5].

## *2.2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ МИОМ*

В основу классификации положены как конструктивные формы деталей, так и технологические схемы штамповки.

На рис. 2.3, 2.4, 2.5 представлены классификаторы трубчатых и плоских деталей и узлов летательных аппаратов, рекомендуемых для изготовления магнитно-импульсной обработкой.

В основу классификации положены формы исходных заготовок, конструктивные особенности деталей, технологические схемы штамповки и тип осуществляемой операции. В соответствии с этим все детали, изготавливаемые с помощью энергии ИМП, делятся на три класса:

I класс — детали, получаемые из трубчатых заготовок по схеме «обжим» с помощью цилиндрического или конического индуктора (рис. 2.3). Давление магнитного поля действует по всей поверхности заготовки, охватываемой индуктором или электродом.

II класс — детали, получаемые из трубчатых заготовок по схеме «раздача» с помощью цилиндрического или конического индуктора (рис. 2.4). Давление магнитного поля действует по всей поверхности заготовки, охватывающей индуктор или электрод.

III класс — детали, получаемые из листовых заготовок любого профиля с помощью плоского малогабаритного индуктора, расположенного над или под тем участком заготовки, где происходит деформация (рис. 2.5). В отличие от деталей предыдущих двух классов, при обработке трубчатых заготовок давление поля действует главным образом на деформируемый участок.

В соответствии с типом проводимых технологических операций детали и узлы в каждом классе классификатора разбиваются на три группы:

1-я группа — детали, изготавливаемые с помощью разделительных операций;

2-я группа — детали, изготавливаемые с помощью формообразующих операций;

3-я группа — детали и узлы, получаемые с помощью сборочных и сварочных операций.

В третью группу включены различные узлы и соединения, состоящие из нескольких деталей, включая соединения металлических деталей с пластмассами, керамикой, фарфором и т. п.

Каждая группа состоит из отдельных подгрупп в зависимости от конструкции деталей и наименования проводимой технологической операции. Каждому типу деталей присвоен номер.

### *2.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ И УСЛОВИЯ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ*

В практике энергия ИМП широко используется для осуществления операций листовой штамповки и сборки. Исходя из классификатора деталей (см. рис. 2.3, 2.4, 2.5) все выполняемые операции можно разбить на четыре группы: разделительные, формообразующие, сборочные и комбинированные.

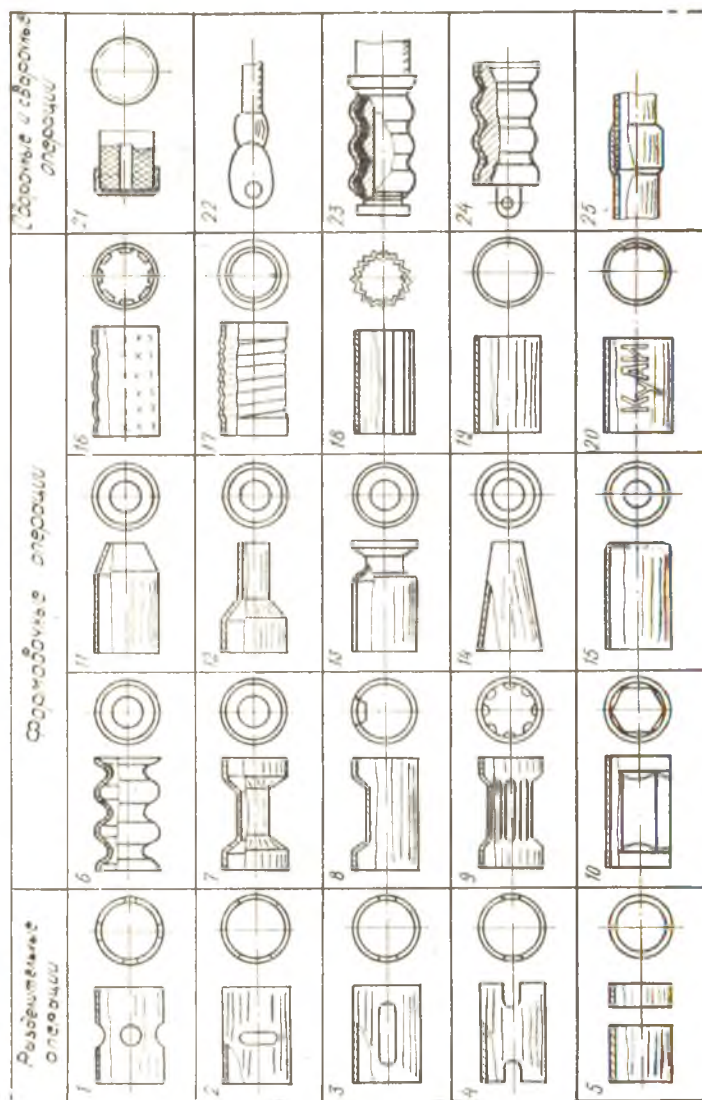


Рис. 2.3. Классификатор деталей I класса и основные технологические операции, выполняемые по схеме «обжим»

Разделительные операции	Формовые операции				Сборочные и сборочные операции
1	6	11	16	21	
2	7	12	17	22	
3	8	13	18	23	
4	9	14	19	24	
5	10	15	20	25	

Рис. 2.4. Классификатор деталей II класса и основные технологические операции, выполняемые по схеме «раздача»

Разделительные операции	Формовочные операции		Сборочные и сборочные операции	
1	6	11	16	21
2	7	12	17	22
3	8	13	18	23
4	9	14	19	24
5	10	15	20	25

Рис. 2.5. Классификатор деталей III класса и основные технологические операции, выполняемые во время плоской штамповки

Все они осуществляются по трем вышеописанным схемам: «обжим», «раздача» и «плоская штамповка» (см. рис. 2.1,а,б,в).

Схема обработки на обжим используется для пробивки отверстий любой конфигурации, обрезки, разрезки труб, для формовки трубчатых заготовок, для калибровки труб, сборки и сварки трубчатых деталей с наконечниками и между собой.

Оправки и матрицы, используемые при обжиге, выполняются разъемными для облегчения снятия отштампованной заготовки. В процессе обработки заготовка плотно приляжет к поверхности оправки и примет заданную форму. В ряде случаев при соединении деталей между собой оправки не требуется, так как ее роль выполняет охватываемая деталь (рис. 2.3, поз 24).

Схема обработки на «раздачу» используется для обрезки и резки трубчатых заготовок, пробивки отверстий в трубах, для формовки кольцевых и продольных зигов, для разбортовки и полой высадки, калибровки, для сборки и сварки. Одновременно с формовкой можно производить пробивку нескольких отверстий или окон, чеканку рисунка, надписи.

При обработке заготовок и узлов по схеме «раздача» применяются цельные или разъемные матрицы. Для сборочных операций в некоторых случаях необходимость в матрице отпадает (рис. 2.4, поз. 24).

По схеме «плоская штамповка» с помощью операций выруб-ки, пробивки отверстий, гибки-формовки, отбортовки отверстий и наружных контуров получают детали из листовых заготовок плоской и пространственной формы. Сборочные операции выполняются с заранее изготовленными деталями (рис. 2.5, поз. 21).

Для плоской штамповки применяется простая штамповочная оснастка одного наименования — матрица или пуансон. Индукторы, используемые для штамповки листовых заготовок одинарной или двойной кривизны, относятся к категории плоских индукторов.

Разделительные операции, осуществляемые с помощью МИОМ, могут быть проиллюстрированы пробивкой отверстий (рис. 2.3, поз. 1—3, рис. 2.4, поз. 1—3, рис. 2.5, поз. 1, 2, 4), пазов (рис. 2.3, поз. 4, рис. 2.4, поз. 4, рис. 2.5, поз. 3), резкой труб и листовых заготовок (рис. 2.3, рис. 2.4, рис. 2.5, поз. 5).

При вырубке или пробивке кромка среза на заготовке получается скругленной со стороны расположения индуктора. Величина завала кромки находится в пределах 0,5—1,0 мм от толщины заготовки, а величина заусенца не превышает 0,05—0,1 мм. Поэтому отпадает необходимость в снятии заусенцев после выруб-ки, пробивки или резки. Разделительные операции желательно проводить короткими импульсами длительностью

10—100 мкс. Чем короче импульс, тем больше степень локализации пластической деформации в области режущей кромки инструмента и тем меньше величина завала кромки и заусенца. Точность получаемых контуров и отверстий зависит от их конфигурации и размеров фигуры, предпочтительна круглая или овальная форма отверстий. Вершины углов фасонных отверстий и пазов рекомендуется закруглять с  $r = 3$ . Во избежание обрыва и искажения перемычек при одновременной пробивке нескольких отверстий, расположенных близко друг от друга, ширина их не должна быть меньше трех толщин заготовки.

При правильном проектировании технологических процессов точность выполнения разделительных операций может достигать 6—7 квалитета.

Формообразование по схеме «обжим» представлено на рис. 2.3 следующими операциями: рифтовкой поперечной волнистой (поз. 6, 13); рифтовкой поперечной, плоской в сечении (поз. 7, 8); рифтовкой продольной, формообразованием впадины (поз. 9, 10); формообразованием конуса (поз. 11, 14), обжимом концов труб (поз. 12, 15); пуклевкой, изготовлением резьбы, рифлением, калибровкой (поз. 16—20).

В связи с кратковременностью процесса деформирования перемещение металла вдоль образующей заготовки незначительно, поэтому при формовке глубоких рифтов, резьб и впадин возможно значительное утонение стенки трубы в месте локализации деформации.

Формовочные операции, выполняемые по схеме «раздача», имеют существенные преимущества по сравнению с аналогичными операциями, осуществляемыми по схеме «обжим», так как они не требуют сложной технологической оснастки. Для выполнения этих операций применяются легко разбираемые съемные матрицы, по схеме «раздача» выполняются следующие формовочные операции (рис. 2.4): рифтовка поперечная волнистая и полая высадка (поз. 6, 13), рифтовка поперечная плоская в сечении (поз. 7), формообразование выступа (поз. 8), рифтовка продольная (поз. 9, 10), формообразование конуса (поз. 11, 14), концевая раздача труб (поз. 12), отбортовка (поз. 15), пуклевка, изготовление резьб, рифление, калибровка (поз. 16—20).

Формовочные операции, выполняемые по схеме плоской штамповки, приведены на рис. 2.5. Методом МИОМ можно изготавливать детали типа тарелки или днища (рис. 2.5, поз. 6), осуществлять кольцевую (поз. 7), продольную (поз. 8) и радиальную (поз. 9) зиговку, пуклевку (поз. 10). По указанной схеме производится неглубокая отбортовка по наружному контуру диска (поз. 11) и прямоугольника (поз. 12), а также осуществляется отбортовка круглых и прямоугольных отверстий (поз. 13, 14).

Операции формовки тороидальных крышек, рельефной формовки с одновременной рифтовкой деформируемой части заготовки и калибровки листовых заготовок приведены на рис. 2.5 (поз. 15—20).

Большие инерционные силы, присущие процессам МИОМ, затрудняют проведение операций, связанных с глубокой вытяжкой листового материала. Так как силы инерции уменьшаются с увеличением длительности импульса, то формообразующие операции рекомендуется проводить при пониженных частотах разряда по сравнению с разделительными операциями, операциями калибровки и др.

Точность формообразующих операций определяется точностью инструмента и исходной заготовки. Точность деталей на поверхности, сопрягаемой с инструментом, может достигать 5—6 качества.

Наличие магнитной или воздушной подушки может привести к снижению качества деталей, появляются недоштампованные участки.

Сборочные и сварочные операции занимают большой объем среди всех выполняемых методом МИОМ операций. Это обуславливается тем, что при применении для сборки давления магнитного поля удается получить равномерную деформацию наружной детали и тем самым обеспечить качественное соединение.

Сборочные и сварочные операции, выполняемые по схеме «обжим», приведены на рис. 2.3. С помощью МИОМ осуществляется операция напрессовки металлических деталей на детали из пластмасс, фарфора, керамики, стекла и т. п. (рис. 2.3, поз. 21). При выполнении сборки таких деталей необходимо соблюдать условия, чтобы зазор между соединяемыми деталями был минимальным и равномерным по всей поверхности. Кроме того, масса основания должна быть значительно больше массы напрессовываемой детали. В противном случае при напрессовке на хрупкое основание оно может разрушиться.

Напрессовка металлических деталей на пластичные основания может быть иллюстрирована операцией сборки кабельных наконечников с электропроводами (рис. 2.3, поз. 22). Достигается высокое качество соединения. Электрическое контактное сопротивление места соединения, полученного МИОМ, в 1,5—2 раза меньше электрического контактного сопротивления соединения, изготавливаемого традиционными методами. Механическая прочность соединения на разрыв не уступает прочности самого электропровода.

Хорошие результаты получаются при напрессовке методом МИОМ канатов и тросов.



Соединения рукавов высокого давления с концевой арматурой (поз. 23, рис. 2.3), выполненные методом МИОМ, более надежны, чем соединения, осуществленные традиционными способами. Рукава, собранные рассматриваемым способом, могут надежно работать при давлениях жидкости в них  $100 \text{ МН/м}^2$  и более. Равномерность давления магнитного поля по окружности муфты при ее напрессовке на резиновый или фторопластовый рукав обеспечивает получение плотного контакта между рукавом и ниппелем. Для обеспечения надежного соединения необходимо при сборке сжимать стенку рукава на 48—50%.

Напрессовка трубы на металлические наконечники (рис. 2.3, поз. 24) давлением импульсного магнитного поля позволяет заменить трудоемкие процессы сборки этих деталей при помощи резьбы, заклепок, штифтов.

Сварка трубчатых заготовок (рис. 2.3, поз. 25) лучше всего достигается на парах металлов медь—медь, медь—алюминий, алюминий — алюминий, медь — сталь. Для получения сварного соединения необходимо, чтобы скорость соударения наружной трубы с внутренней была максимальной. Кроме того, требуется осуществить соударение труб не по всей поверхности, а в некоторой текущей точке или линии, чтобы получить перемещение металла свариваемой зоны не только в радиальном направлении, но и вдоль образующей трубы. Это достигается в результате создания эпиюры давления поля треугольной формы или применения наружной трубы с конической частью. Для предохранения внутренней трубы от деформации в нее вставляется металлическая оправка.

Сборочные и сварочные операции, выполняемые по схеме «раздача», представлены на рис. 2.4: получение сваркой биметаллических соединений (поз. 21), сборка шарниров (поз. 22), сварка трубчатых заготовок (поз. 23), запрессовка труб в дисках, трубных досках (поз. 24, 25).

При выполнении трех первых операций используется жесткая матрица.

По схеме «плоская штамповка» может производиться ряд сборочных операций (рис. 2.5): сборка диска с осью (поз. 21), отбортовка диска (поз. 22) с последующим обжатием на цилиндрическом основании, сварка двух листов металла (поз. 23), напрессовка втулок на оси и запрессовка вкладышей в трубах (поз. 24, 25).

Сборка диска с осью (рис. 2.5, поз. 21) осуществляется с помощью спирального индуктора, диаметр которого больше, чем диаметр диска заготовки. При разряде энергии через индуктор возникает составляющая давления магнитного поля, осуществляющая уменьшение внутреннего отверстия диска. Таким обра-

зом, можно обжимать отверстие диска на оси, а также уменьшать отверстия в листовых заготовках.

Сварка двух листов металла (рис. 2.5, поз. 23) производится путем разгона и соударения. Разгон металлических при встречном метании листов осуществляется под действием сил магнитного поля, создаваемого двумя последовательно включенными индукторами. Для обеспечения качественной сварки необходимы условия, исключающие проникновение магнитного поля в зону сварки, метод позволяет получить сварку различных материалов и сплавов.

Сборочные операции методом МИОМ имеют ряд преимуществ перед существующими методами. Отсутствие подвижных частей инструмента значительно упрощает технологическую оснастку, облегчает процессы механизации и автоматизации сборки.

Способность электрического поля проникать через изоляторы делает возможным проведение сборочных операций деталей внутри герметичных сосудов, что особенно важно, если необходимы стерильность сборки, сборка в вакууме или в среде инертных газов.

Соединения деталей методом МИОМ могут сочетаться с клеевыми соединениями и пайкой.

Сборка с использованием энергии ИМП обеспечивает высокую прочность, плотность и герметичность соединения.

Комбинированные операции, выполняемые методом МИОМ, представляют собой различные сочетания разделительных, формообразующих и сборочных операций.

Схемы типовых комбинированных операций аналогичны вышеприведенным и отличаются только конструктивными элементами технологической оснастки. Поэтому особенности метода, отмеченные выше для первых трех групп операций, остаются в силе и для комбинированных.

Возможность одновременного выполнения той или иной комбинации операций определяется конструкцией детали, технологической оснасткой и параметрами каждой операции: величиной потребляемой энергии, скоростью деформирования металла, длительностью и т. д.

Несоответствие скоростей протекания отдельных технологических операций и необходимых величин энергии может вызвать затруднения при изготовлении ряда деталей.

Примерами могут служить пробивка и формообразование, формообразование и сборка и др. Например, комбинация разделительной и формообразующей операций может оказаться невыполнимой за один разряд установки, если первая операция завершается быстрее второй. Изготовленные в результате выполнения разделительной операции пазы и отверстия могут пре-

рвать ток в заготовке, в результате чего формообразующая операция не может быть осуществлена.

Совмещение формообразующих операций и разделительных с операцией калибровки в большинстве случаев позволяет сократить количество операций, значительно повысить точность и качество деталей, уменьшить трудоемкость изготовления деталей, что в конечном счете положительно сказывается на их себестоимости. Поэтому вопрос о совместимости операций должен решаться конкретно в каждом случае.

#### *2.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССОВ МИОМ И ТРЕБОВАНИЯ К ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ И ЗАГОТОВКАМ*

Магнитно-импульсная обработка металлов обладает широкими технологическими возможностями для производства разнообразных видов обработки металлов давлением.

Эффективность деформирования при осуществлении операций МИОМ зависит от многих факторов, но в первую очередь следует выделить электропроводность обрабатываемой заготовки и геометрические параметры системы индуктор-заготовки.

На низкочастотных магнитно-импульсных установках (с собственной частотой разряда до 30 кГц) наиболее эффективно обрабатываются материалы и сплавы с высокой электропроводностью (медные, алюминиевые, магниевые сплавы, золото, серебро и т. д.). Обработку металлов, электропроводность которых примерно в пять раз меньше электропроводности меди, рекомендуется производить на МИУ с высокой собственной частотой разряда (60—150 кГц) или на низкочастотных установках с применением промежуточной проводящей прокладки («спутника»), размещаемой между индуктором и обрабатываемой заготовкой. С помощью МИОМ можно обрабатывать листовые заготовки самой разнообразной формы: плоские, цилиндрические, сферические и знакопеременной кривизны, трубчатые с круглым, овальным и прямоугольным сечением, конические и др. Размеры обрабатываемых листовых деталей (обрабатываемая площадь, диаметр и высота, толщина стенки) определяются энергоемкостью используемой установки, электропроводностью обрабатываемой заготовки, конструктивными возможностями выполнения индуктора и технологической оснастки, возможной стойкостью индуктора.

На магнитно-импульсных установках с энергоемкостью до 65 кДж обрабатываются листовые заготовки в холодном и нагретом состоянии с размерами:

плоские — с обрабатываемой площадью до 1 м<sup>2</sup>,  
трубчатые на раздачу — с диаметром 30...1000 мм,

трубчатые на обжим — с диаметром 5...1000 мм,  
из меди и ее сплавов — толщиной до 4 мм,  
из алюминиевых сплавов — толщиной до 5 мм,  
из пластичных сталей (08КП, 10, 20, X18H10T и т. п.) — толщиной до 2 мм,  
из труднодеформируемых сталей и сплавов (титановых, жаропрочных и т. п.) — толщиной до 1,5 мм.

Нижний предел толщины стенки заготовки при ее деформировании по неэлектропроводной матрице или оправке определяется по формуле

$$s_{\min} \geq 0,5 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \pi f}}, \quad (2.1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная вакуума,  
 $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала заготовки,  
 $f$  — рабочая частота разряда установки.

В случае деформирования заготовки по металлической матрице или оправке минимальная толщина стенки определяется из выражения

$$s_{\min} \geq 2 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \pi f}}. \quad (2.2)$$

Невыполнение первого условия (2.1) снижает КПД процесса обработки, а невыполнение второго условия, кроме того, ведет к образованию обратного давления за счет эффекта «магнитной подушки», которая препятствует перемещению стенки заготовки в сторону оправки или матрицы.

Верхний предел толщины (2.2) обрабатываемой заготовки зависит от энергоемкости МИУ, удельного веса материала заготовки и стойкости индуктора. В случае общих равных условий при деформировании заготовок с большой массой стойкость индуктора уменьшается.

При обработке деталей важно, чтобы геометрия заготовки обеспечивала непрерывность протекания наведенного тока. Наибольшая эффективность обработки достигается в том случае, если конфигурация индуктора будет соответствовать конфигурации деформируемой заготовки.

Из условия (2.1) выбирается толщина «спутника» при обработке заготовок из материала с низкой электропроводностью. Предпочтительный материал для «спутника» — медь отожженная марки М1 или алюминиевые сплавы марок АДМ, АД1М, Д16М. Габаритные размеры «спутника» ограничиваются зоной, в которой протекает деформация заготовки. Рекомендуется на 1...3 мм перекрывать «спутником» обрабатываемую зону заготовки.

К форме и геометрии «спутника» предъявляются те же требования, что и к обрабатываемой заготовке. При штамповке трубчатых заготовок в качестве «спутника» используются ленточные намотки из медной или алюминиевой фольги. При этом требуется обеспечение надежного электрического контакта между витками ленты.

«Спутником» также может служить гальваническое покрытие. К толщине гальванического покрытия предъявляются те же требования, что и к «спутникам». При МИОМ «спутники» используются также для деформирования заготовок из неметаллических материалов.

Листовые и трубчатые заготовки для МИОМ могут быть как цельными, так и сварными. Качество сварного шва должно быть высоким. Вследствие большой скорости деформации при МИОМ дополнительная масса металла сварного шва нарушает симметричность деформации. При удалении выпуклости сварного шва необходимо следить за его целостностью. Нарушение целостности шва препятствует протеканию индуктированного тока в заготовке, а следовательно, снижает эффективность формообразования.

Определение размеров и формы заготовки для штамповки ИМП производится, как и для обычной штамповки, на прессах [7], исходя из условия равенства поверхности заготовки и детали с учетом технологического припуска.

На эффективность процесса обработки большое влияние оказывает расстояние между индуктором и заготовкой. Наибольшая эффективность достигается при минимальном зазоре между заготовкой и индуктором, так как зазор — один из важнейших факторов, влияющих на величину давления магнитного поля. Опыт показывает, что нормальным зазором при существующей конструкции индукторов можно считать зазор 1,0—3,0 мм на диаметр или 0,5—1,5 мм для плоского индуктора.

При магнитно-импульсной обработке необходимо обеспечивать выход воздуха из полостей матриц, заполняемых заготовкой при формообразовании. Для отвода воздуха в ряде случаев сверлятся отверстия с малыми диаметрами.

В процессах магнитно-импульсной штамповки деталей из магниевых, титановых сплавов необходимо предусматривать предварительный нагрев заготовок, как и при других методах формообразования, а также учитывать увеличение удельного электрического сопротивления обрабатываемой заготовки и, следовательно, глубины проникновения магнитного поля вследствие нагрева.

При разработке технологических процессов МИОМ необходимо учитывать некоторые ограничения:

процесс не может производиться успешно или не производится вообще, если на заготовке имеются пазы или отверстия, препятствующие протеканию разрядного или наводимого токов, т. е. заготовка должна обеспечивать непрерывный электрический контур;

если частота тока мала, то магнитное поле может проникнуть за стенку заготовки и вызвать явление «магнитной подушки». Особенно часто это явление наблюдается при обработке металлов и сплавов с низкой электропроводностью (титана, нержавеющей сталей, жаропрочных и тугоплавких сплавов) на установках с низкой собственной частотой разряда (менее 30 кГц);

не все геометрические размеры заготовок позволяют обрабатывать их методом МИОМ. Например, из-за малой длительности импульса давления деформирование сплошных монолитных металлических заготовок (прутков) не представляется возможным;

ряд существующих конструкций индукторов обладает недостаточно высокой стойкостью при обработке деталей из труднодеформируемых материалов с низкой электропроводностью.

## *2.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ*

В процессах штамповки при динамическом нагружении механические свойства материалов изменяются в зависимости от скорости деформации [8]. Исследования высокоскоростного деформирования металлов показали, что с увеличением скорости деформации у ряда марок материалов повышаются, как правило, механические характеристики: предел прочности  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и уровень напряжений вдоль всей кривой текучести. Имеет место интенсивный рост предела текучести по сравнению с ростом предела прочности, некоторый рост относительного удлинения  $\delta$ . Относительное сужение  $\psi$  практически мало изменяется. Способность металлов и сплавов к пластической деформации не уменьшается, а для некоторых металлов даже увеличивается. Например, в работе [9] отмечено, что при деформации с использованием энергии ИМД трубчатых заготовок наблюдается повышенная пластичность алюминиевых сплавов: предельная тангенциальная деформация возрастает в 2—4 раза по сравнению с деформацией при статическом нагружении. Эффект увеличения пластичности связывается с разогревом деформируемой заготовки вихревыми токами и более равномерным протеканием деформации по объему.

В настоящее время в литературе имеется мало достоверных данных по механическим свойствам материалов при различных скоростях деформации. Поэтому за основу учета количественного изменения механических свойств материала при динамическом нагружении можно взять данные, имеющиеся в работах [8, 10], собранные из различных источников.

Изменение механических свойств в расчетах необходимо учитывать введением коэффициентов динамичности, которые представлены в табл. 2.2.

В табл. 2.3. приведены электрические и типичные механические свойства листовых материалов, применяемых для формообразования деталей.

Таблица 2.2

*Коэффициенты динамичности для листовых материалов при импульсной обработке*

Материал	Изменения характеристик материалов (в $\times$ раз)			
	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	Предел прочности $\sigma_B$	Относительное удлинение $\delta$	Относительное сужение $\psi$
Алюминий	1,5	1,3	1,5	1,1
Д16АМ	1,5	1,3	1,5	1,0
Д16АТ	1,5	1,3	1,5	1,1
АМг6М	1,5	1,35	1,4	1,4
Малоуглеродистые стали	1,5	1,3	1,3	1,0
Углеродистые стали	1,9	1,4	1,4	3,0
Медь	1,4	1,4	1,5	1,0
МА2-1	1,3	1,5	0,75	1,0
МА8	1,4	1,7	1,3	1,07
ОТ-4	1,6	1,5	0,85	0,94
ВТ-14	1,35	1,21	1,0	1,21
Х18Н9Т	1,45	1,6	0,9	0,9
ЭИ-962А	1,6	1,2	1,2	1,1
ЭП-257	1,6	1,4	1,2	1,05

Таблица 2.3

## Механические и электрические свойства листовых материалов

Марка материала	Предел прочности $\times 10^7$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести $\times 10^7$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Удельное электрическое сопротивление $\times 10^{-8}$ , Ом·м	Глубина проникновения $\Delta$ , мм			
					5 кГц	10 кГц	20 кГц	50 кГц
Золото	8—15	—	—	2,2	1,055	0,746	0,527	0,334
Серебро	15—30	—	—	1,6	0,898	0,636	0,449	0,285
Медь	24	7	50	1,78	0,95	0,67	0,48	0,3
Латушь-Л90	26	12	45	4,0	1,42	1,01	0,71	0,45
Л68	32	10	55	7,2	1,91	1,35	0,95	0,602
ЛС59-1	40	14	45	6,8	1,86	1,31	0,93	0,587
Л62	33	11	50	7,2	1,73	1,22	0,86	0,546
Бронза БрОЦ4-3	35	65	40	8,7	2,1	1,48	1,05	0,664
БрАМц9-2	40	30	25	11	2,36	1,67	1,18	0,748
БрБ-2	50	30	30	6,8	1,86	1,31	0,93	0,587
Алюминиевые сплавы								
АДМ и АД1М	8	3	35	2,92	1,22	0,86	0,61	0,385
АМцМ	13	5	23	3,76	1,38	0,98	0,69	0,436
АМг6М	30	15	18	7,1	1,9	1,34	0,95	0,6
Д16АМ	21	11	18	4,15	1,45	1,02	0,72	0,46
Д16АТ	42	28	18	5,87	1,72	1,22	0,86	0,545
В95М	22	10	15	4,15	1,43	1,02	0,74	0,46
Магниеые сплавы								
МА1-М	21	12	8	6,1	1,76	1,24	0,88	0,556
МА2-1М	29	20	18	—	—	—	—	—
МА8-М	26	19	18	5,1	1,61	1,15	0,8	0,51
Углеродистые стали								
Ст10	40	25	35	19,25	3,12	2,21	1,56	0,99
Ст20	48	30	33	24,2	2,7	1,9	1,34	0,85
Ст35	58	37	25	—	—	—	—	—
Ст3	38	24	37	16,4	2,9	2,04	1,44	0,913
Легированные стали								
30ХГСА	70	45	22	—	—	—	—	—
1Х18Н9Т	99	30	50	7,2	6,04	4,2	3,02	1,91
ЭИ-962А	78	55	28	—	—	—	—	—
ЭП-257	76	46	27	—	—	—	—	—
Титановые сплавы								
BT5-1	90	80	14	138	8,36	5,91	4,18	2,65
BT14	100	90	10	—	—	—	—	—
BT6	95	86	10	—	—	—	—	—
OT4-1	68	41	63	—	—	—	—	—
BT1-2	65	55	24	—	—	—	—	—



### *3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ*

#### *3.1. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ*

Перед тем как приступить к разработке технологического процесса штамповки какой-либо детали, технологу необходимо определить на основе экономических расчетов метод эффективной обработки. После выбора метода обработки разрабатывается технологический процесс штамповки.

Разработка технологического процесса штамповки детали осуществляется в следующей последовательности:

- а) выбор последовательности обработки и разработка схем штамповки;
- б) определение размеров заготовок и способа их раскроя;
- в) определение для деталей сложной формы количества операций и формы сечения детали для каждой операции;
- г) расчет потребной энергии деформирования для каждой операции и выбор магнитно-импульсной установки;
- д) определение методов технического контроля качества готовых деталей и контроля в процессе обработки;
- е) определение норм времени на выполнение операций;
- ж) проектирование и изготовление инструмента, индукторов.

Выбор технологической схемы штамповки является важным этапом при проектировании технологического процесса. При разработке схемы штамповки должны учитываться следующие факторы: форма и размеры заготовки, величина электропроводности материала заготовки, величина потребной энергии для деформирования, технические характеристики магнитно-импульсной установки и др.

Для каждой конкретной детали определяются размеры заготовок и раскроя, число переходов, необходимость межоперационной термообработки и предварительного нагрева заготовок перед штамповкой.

Выбор количества переходов (операций) при штамповке зависит от допустимой величины деформации материала и от степени деформации готовой детали. Величина допустимой деформации материала — уменьшение толщины стенки готовой детали ограничивается конструктором при проектировании детали и указывается в технических условиях чертежа. Исходя из допустимой деформации, расчетным путем определяется количество переходов (операций).

### *3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗАПАСАЕМОЙ ЭНЕРГИИ В КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕЕ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ШТАМПОВКИ*

Величина энергии в джоулях, запасенной в конденсаторной батарее, определяется по формуле

$$E_3 = \frac{1}{2} CU^2.$$

При постоянстве емкости конденсаторной батареи  $C$  конкретной МИУ решение задачи сводится к определению напряжения зарядки конденсаторной батареи  $U$ .

Определение величины запасаемой энергии производится исходя из потребной работы деформации  $A$  с учетом КПД процесса на конкретной МИУ (1.26):

$$E_3 = A / \eta. \quad (3.1)$$

Коэффициент полезного действия процесса на конкретной установке  $\eta$  зависит от многих факторов, основные из которых следующие:

механические свойства, электропроводность и удельный вес материала заготовки;

форма заготовки — плоская, изогнутая или трубчатая;

выполняемая операция — формовочная, калибровочная, разделительная и т. д.;

параметры установки, главные из которых: частота изменения разрядного тока, паразитная индуктивность и активное сопротивление цепи разряда и др.;

согласованность системы индуктор — заготовка, число витков индуктора, величина зазора и др.

Рабочее напряжение зарядки для конкретной МИУ при постоянной емкости конденсаторной батареи определяется из выражения

$$U = \sqrt{\frac{2A}{\eta C}}. \quad (3.2)$$

Расчет работы деформации осуществляется по методике, изложенной в подразделе 3.3.

### *3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ДЕФОРМАЦИИ*

При проектировании технологических процессов с использованием импульсных источников нагружения важнейшим энергетическим параметром является работа деформирования, которая позволяет определить необходимые внешние энергозатраты.

Работа пластического высокоскоростного деформирования материала в общем случае выражается зависимостью [11]

$$A = \int_t \int_V \int_V (E_0 + L_0) dV dt, \quad (3.3)$$

где  $E_0$  — функция диссипации энергии, которая характеризует энергию, расходуемую непосредственно на формоизменение детали,

$L_0$  — скоростная функция характеризует ту часть энергии, которая идет на сообщение кинетической энергии деформируемому объему,

$V$  — объем деформируемого металла,

$t$  — время деформации.

Для определения потребной работы деформации высокоскоростного процесса штамповки листового металла удобно пользоваться энергетическим методом расчета.

Работа, совершаемая напряжениями при переходе элемента тела единичного объема из недеформированного состояния в деформированное, определяется выражением

$$a = \int_0^{e_i} \sigma_i(e_i) d e_i, \quad (3.4)$$

где  $\sigma_i$  — интенсивность напряжений,

$e_i$  — интенсивность деформаций.

Полная работа деформации или энергия формоизменения детали равна интегралу по всему объему деформируемого материала:

$$A = \int_V \left[ \int_0^{e_i} \sigma_i(e_i) d e_i \right] dV. \quad (3.5)$$

Выражения интенсивности напряжений и деформаций через главные напряжения и деформации будут иметь следующий вид:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \quad (3.6)$$

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}, \quad (3.7)$$

где  $\sigma_1$  — главное нормальное напряжение, алгебраически наибольшее;  $\sigma_2$  — главное нормальное напряжение, алгебраически среднее;  $\sigma_3$  — главное нормальное напряжение, алгебраически наименьшее;  $e_1$  — главный компонент деформации в направлении первой главной оси, т. е. в направлении наибольшего удлинения;  $e_2$  — главный компонент деформации в направлении,

перпендикулярном направлениям удлинения и укорочения (наибольшего);  $e_3$  — главный компонент деформации в направлении наибольшего укорочения.

При формообразовании деталей из листовых или трубчатых заготовок возможны следующие схемы деформированного состояния (или близкие к этим схемам):

1) двухосное растяжение, когда  $e_1 = e_2$ , а  $e_3 = -(e_1 + e_2)$ ; при этой схеме по формуле (3.7) интенсивность деформаций  $e_i = 2 e_1$ ;

2) плоское деформированное состояние, когда  $e_1 = e_3$ , а  $e_2 = 0$ , в этом случае  $e_i = 1,155 e_1$ ;

3) одноосное растяжение, когда  $e_2 = e_3 = -1/2 e_1$ , а интенсивность деформации  $e_i = e_1$ .

При расчете работы деформации для определенного материала истинное напряжение  $\sigma$  можно представить как функцию от истинной степени деформации  $e$ . Эта зависимость для большинства материалов и сплавов выражается уравнением — степенной аппроксимацией диаграммы  $\sigma = f(e)$  [3]

$$\sigma = K e^n, \quad (3.8)$$

где  $K$  и  $n$  — постоянные величины для данного материала, характеризующие интенсивность упрочнения.

Определение констант  $K$  и  $n$  производится из условия, чтобы кривая, записанная уравнением (3.8), проходила через точки предела текучести ( $\sigma_s, e_s$ ) и предела прочности ( $\sigma_k, e_k$ ) истинной кривой упрочнения:

$$n = \frac{\lg \sigma_k - \lg \sigma_s}{\lg e_k - \lg e_s}; \quad K = \frac{\sigma_k}{\sigma_k^n}, \quad (3.9)$$

где  $\sigma_s, e_s$  — истинное напряжение и относительная деформация предела текучести,  $\sigma_k, e_k$  — истинное напряжение и относительная деформация предела прочности.

Значения истинных напряжений и деформаций можно определить в результате механических испытаний образцов на растяжение по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_k &= \sigma_b (1 + \delta_p); & e_k &= \delta_p; \\ \sigma_s &= \sigma_{0,2}; & e_s &= 0,002 + \frac{\sigma_{0,2}}{E}, \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

где  $\sigma_b$  — предел прочности,  $\sigma_{0,2}$  — предел текучести,  $\delta_p$  — наибольшее равномерное удлинение, оно определяется из выражения  $\delta_p = 2 \delta_{10} - \delta_5$ ;  $\delta_{10}$  и  $\delta_5$  — относительные удлинения, рассчитанные соответственно на десятикратной и пятикратной длине одного и того же образца,  $E$  — модуль упругости.

Удельную работу деформации единичного объема материала заготовки при любой схеме напряженного состояния следует определять по формуле

$$a_i = \frac{K}{1+n} \epsilon_i^{1+n}, \quad (3.11)$$

где интенсивность деформации соответствует данной схеме напряженного состояния.

Полная работа деформации заготовки определяется как произведение удельной работы, т. е. работы, отнесенной к единичному объему, на весь объем деформированной части заготовки:

$$A = a_i \cdot V. \quad (3.12)$$

При практических расчетах, когда схема деформированного состояния близка к плоской или одноосному растяжению, можно считать, что интенсивность деформации близка к наибольшей деформации, т.е.  $\epsilon_i = \epsilon_1$  [3, 10]. А так как обычно в различных участках штампуемых деталей величина деформации имеет разное значение, то при расчете удельной работы деформации по формуле (3.11) необходимо пользоваться средними величинами  $\epsilon_{i\text{cp}}$  или  $\epsilon_{i\text{ср}}$ .

#### 3.4. РАБОЧАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ МИОМ

Штамповая оснастка для процессов МИОМ отличается простотой конструкции и малой металлоемкостью. Описание схем штамповки и конструкции инструмента для штамповки приводится в подразделах 2.1, 2.2, 2.3. Для большинства сборочных операций потребность в дополнительном инструменте отпадает вообще.

Форма и размер инструмента — оправки, матрицы, пуансона определяются геометрией обрабатываемой детали, видом технологической операции, а также конструкцией вспомогательных приспособлений и рабочего стола установки магнитно-импульсной обработки.

Оснастка для МИОМ в зависимости от количества деталей и требуемой точности может быть изготовлена из металлических и неметаллических материалов. Материалом для металлических матриц, оправок и пуансонов в мелкосерийном производстве служат конструкционные стали типа Ст3, стали 45 и др., для неметаллических — стеклопластики, текстолиты, балонит и др. При серийном и крупносерийном производстве применяется инструмент из легированных инструментальных или цементируемых сталей с закалкой и отпуском рабочих поверхностей. Чистота обработки рабочих поверхностей должна быть не менее  $R_a = 1,25—0,63$ .

Применение пластмассовых матриц при осуществлении формообразующих операций устраняет возможность появления искрения между заготовкой и матрицей, вызывающего пригары на поверхностях заготовки и инструмента, уменьшает величину отскока заготовки от инструмента после соударения, во многих случаях ликвидирует или снижает действие магнитной подушки. Все это способствует повышенной точности и качества изделий. Недостатком пластмассовой оснастки является невысокая механическая прочность, обуславливающая низкую стойкость инструмента. С целью увеличения стойкости пластмассового инструмента применяются различные элементы усиления: обоймы, бандажы, стяжки и т. п.

Глухие полости между заготовками и внутренними поверхностями матриц для магнитно-импульсной штамповки обычно вакуумируют или в них предусматривают отверстия для выхода воздуха во избежание недоштаповки.

Точность инструмента определяется точностью изготавливаемой детали.

С целью облегчения установки заготовок и уменьшения усилия съема готовых деталей оправки и матрицы рекомендуется изготавливать разъемными или с небольшой конусностью, полировать рабочие поверхности до  $R_a = 0,32-0,16$  и смазывать тонким слоем машинного масла.

При продольном разъеме вихревые токи, наводимые в металлической матрице, могут вызвать искрение в месте разъема и послужить причиной пригаров на поверхности обрабатываемой заготовки. Поэтому поверхности разъема матриц необходимо плотно пригонять друг к другу для обеспечения хорошего электрического контакта. Половины матриц центрируются при помощи штифтов.

В тех случаях, когда форма и размеры позволяют применять металлические матрицы и оправки и с продольным, и с поперечным разъемом, предпочтительнее следует отдавать поперечному, так как поперечный разъем инструмента не прерывает течение вихревых токов, требует меньшей точности пригонки составных частей и обеспечивает более качественное изготовление деталей.

Для крепления частей матриц с продольным разъемом используются зажимные приспособления в виде механических или пневматических тисков.

Для штамповки деталей третьего класса применяются различные матрицы или пуансоны, прижимаемые к поверхности обрабатываемой заготовки. В качестве зажимного устройства могут быть использованы небольшие винтовые прессы, с помощью которых осуществляется крепление как матрицы, так и индуктора.

В условиях серийного и крупносерийного производства используются прижимные устройства с электромеханическим или гидравлическим приводом, который обеспечивает необходимое усилие зажима и более высокую производительность.

## 4. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

### 4.1. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И КЛАССИФИКАЦИЯ ИНДУКТОРОВ

Рабочим инструментом при магнитно-импульсной обработке металлов является индуктор. Он служит для получения сильных магнитных полей. Индуктор представляет собой электромеханический узел, состоящий из токопроводящей спирали, корпуса, элементов механического усилия, токоподводов и изоляции витковой и главной (рис. 4.1.). Индуктор предназначен для создания потребного давления импульсного магнитного поля на обрабатываемую поверхность заготовки по контуру и вдоль образующей.

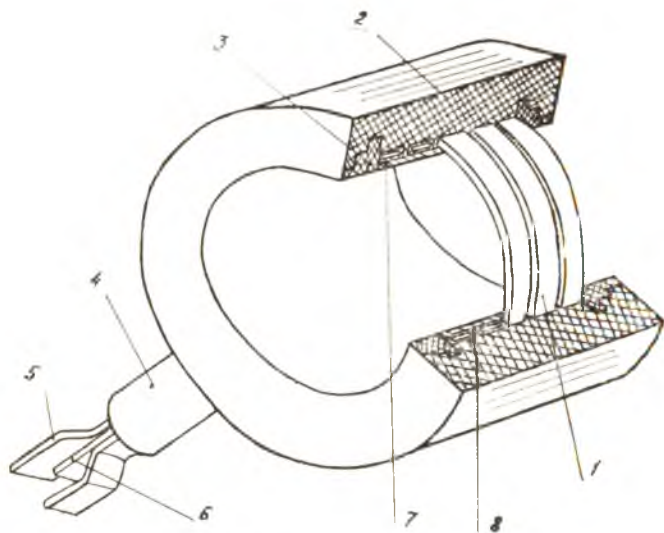


Рис. 4.1. Многовитковый индуктор для обжима трубчатых заготовок: 1 — токопровод, 2 — корпус, 3 — фланец, 4 — бандаж, 5 — токоподвод, 6 — прокладка, 7 — главная изоляция, 8 — витковая изоляция

Классификация индукторов, применяемых для магнитно-импульсной обработки трубчатых и плоских заготовок, проводится по конструктивно-технологическим признакам. Индукторы разделяются на следующие типы:

1) по технологическим признакам в зависимости от характера выполняемой операции (см. рис. 2.1):

индукторы для обжима трубчатых заготовок (рис. 4.1);

индукторы для раздачи трубчатых заготовок (рис. 4.2);

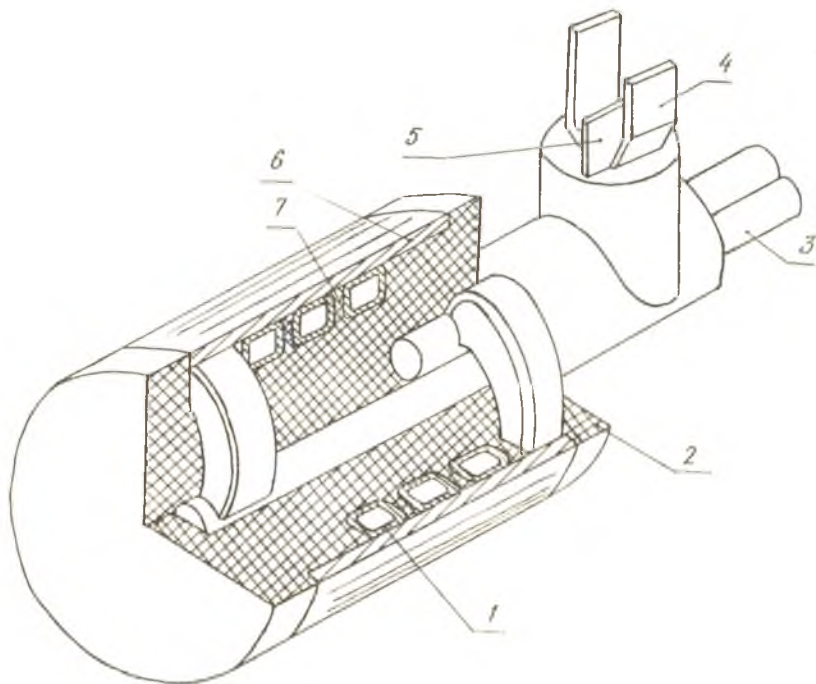


Рис. 4.2. Многовитковый индуктор для раздачи трубчатых заготовок с системой охлаждения: 1 — токопровод, 2 — основание, 3 — штуцер охлаждения, 4 — токоподвод, 5 — прокладка, 6 — главная изоляция, 7 — витковая изоляция

индукторы для обработки плоских и листовых пространственных деталей (рис. 4.3);

2) по стойкости и сроку эксплуатации: разового действия, многократного действия;

3) по конструкции спирали: проволочные; ленточные, с навиваемой на ребро спиралью; с точеной спиралью; биметаллические; коаксальные; петлевые; с концентратором магнитного поля;



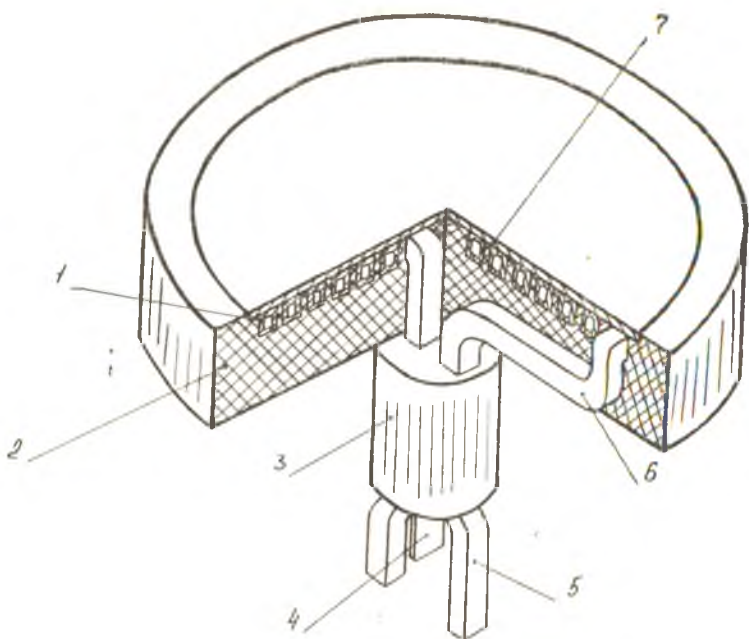


Рис. 4.3. Многовитковый индуктор для обработки плоских и листовых деталей: 1 — витковая изоляция, 2 — корпус, 3 — бандаж, 4 — прокладка, 5 — токопровод, 6 — токопровод, 7 — главная изоляция

- 4) по числу витков: одновитковые; многовитковые;
- 5) по способу охлаждения: неохлаждаемые, с охлаждением спирали;
- 6) по способу подсоединения к энергетической установке: стационарные и выносные.

Индукторы для обработки трубчатых заготовок не обязательно имеют рабочую поверхность в форме цилиндра. Она может быть в форме конуса, сопряженного с одним или двумя цилиндрами, или более сложной.

Форма и конфигурация рабочей поверхности спирали индукторов для плоской листовой штамповки (рис. 4.3) могут быть разнообразными и должны повторять форму и конфигурацию обрабатываемой заготовки.

Одноразовые индукторы представляют собой открытую спираль, не запрессованную в пластмассу. Они служат в основном для предварительной отработки новых технологических операций, а также применяются в условиях единичного производства.

Такие индукторы очень просты в изготовлении, но недостаточно прочны — после выполнения одной—двух операций разрушаются, поэтому для обеспечения безопасности необходимо предусмотреть устройства для защиты от разлетающихся кусков спирали.

Одноразовые индукторы применяются также при выполнении технологических операций, требующих очень больших давлений, под действием которых в спирали индуктора появляются напряжения, превышающие временное сопротивление разрыву.

Индукторы многократного действия сложнее в изготовлении и дороже, поэтому их применение оправдано в условиях серийного производства. Они подразделяются на одновитковые и многовитковые.

Для формирования магнитного поля на обрабатываемом участке заготовки во многовитковых индукторах применяются специальные металлические вставки — концентраторы магнитного поля (рис. 4.4, поз. 3), которые концентрируют усилие на обрабатываемой детали.

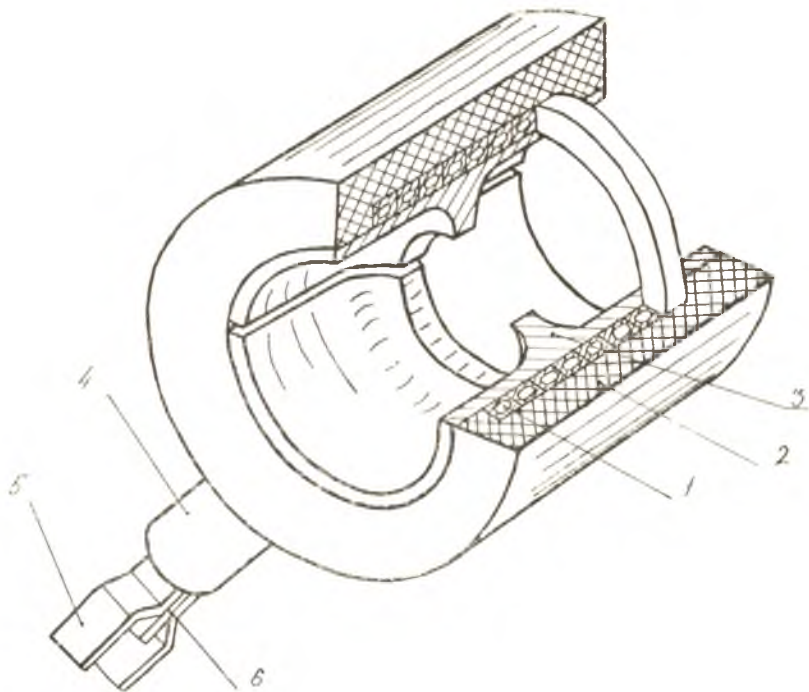


Рис. 4.4. Индуктор для обжима с концентратором: 1 — токопровод, 2 — корпус, 3 — концентратор; 4 — бандаж, 5 — токопровод, 6 — прокладка

По характеру охлаждения различают индукторы неохлаждаемые — с естественным воздушным охлаждением и индукторы с принудительным охлаждением (рис. 4.2).

По способу подсоединения к энергетической установке индукторы могут быть стационарными и выносными. Последние связаны с установкой жгутом из гибких коаксиальных кабелей необходимой длины. Жгут позволяет перемещать индуктор в зоне обрабатываемой детали.

#### *4.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНДУКТОРОВ*

К конструкциям индукторов предъявляются три основных требования: обеспечить высокий коэффициент преобразования электрической энергии, запасенной в накопителе установки, в работу пластической деформации заготовки; обеспечить экономически целесообразную стойкость индуктора, т. е. число разрядов без его разрушения, а также конструктивную и технологическую несложность [1].

Первое требование выполняется путем подбора конфигурации спирали и величины ее индуктивности и электропроводности, обеспечивающих получение на обрабатываемом участке заготовки магнитного поля необходимых параметров с минимальными затратами электрической энергии.

Перечисленные параметры магнитного поля определяются параметрами исходной заготовки и осуществляемой технологической операцией: материал, геометрические размеры, форма заготовки, вид технологической операции и величина работы пластической деформации.

Потери энергии в индукторе складываются из потерь рассеивания магнитной энергии, тепловых потерь.

С целью снижения потерь рассеивания энергии магнитного поля рекомендуется зазоры между токопроводящими элементами индуктора — витками спирали, спиралью и заготовкой, спиралью и концентратором поля и т. п. выполнять минимально допустимыми с учетом достаточной электрической прочности помещаемой в них изоляции, а токоподводы к спирали изготавливать по малоиндуктивной схеме, например, в виде коаксиала или широких плоских шин.

С целью снижения тепловых потерь токопроводящие элементы индуктора — спираль, токоподводы, концентраторы и т. п. следует изготавливать из металлов и сплавов с высокой электропроводностью — медь, латунь, бронза и др.

Выполнение второго требования является наиболее важной задачей.

В процессе деформирования заготовки реакция деформирующих электромагнитных сил воспринимается индуктором. Кроме реактивных сил на спираль индуктора действуют и собственные электромагнитные силы, радиальные составляющие, которые или вычитаются, или складываются с реактивными силами, разрушая или догружая элементы индуктора.

Кроме того, на элементы индуктора действуют высокое электрическое напряжение и повышенная температура. Все это обусловило сложность конструктивного устройства индукторов и трудность обеспечения их высоких технико-эксплуатационных свойств, таких как надежность и долговечность, высокий КПД и удобство эксплуатации, технологичность и низкая стоимость.

Разрушение индуктора происходит в результате механического и теплового воздействия магнитного поля на его спираль и изоляцию.

Типичными видами разрушения от механического воздействия поля являются пластическое деформирование вплоть до разрыва витков спирали и механическое повреждение изоляции спирали, вызывающее короткое замыкание ее витков.

Чрезмерный нагрев индуктора может послужить причиной как электрического пробоя, так и механического разрушения изоляции спирали, так как электрические и механические свойства изоляционных материалов ухудшаются с повышением температуры.

Повышение прочности индукторов достигается различными способами, среди которых необходимо отметить следующие:

- 1) увеличение поперечного сечения витков в радиальном направлении;
- 2) применение биметаллических материалов для изготовления витков; при этом токоведущая часть витка изготавливается из высокоэлектропроводного металла и сопрягается с массивным бандажом из высокопрочного металла с низкой электропроводностью, например из легированной стали;
- 3) экранирование витков и применение принудительного охлаждения;
- 4) применение концентраторов поля.

Одновитковые индукторы многократного действия представляют собой виток спирали из меди, латуни или бронзы, заделанный в корпус и изолированный от него (рис. 4.5). Преимуществом такого индуктора является его высокая механическая прочность. Одновитковые индукторы проще в изготовлении, чем многовитковые, но обладают некоторыми недостатками. Создаваемое индуктором давление магнитного поля зависит от запасаемой энергии и собственной индуктивности установки. Вследствие малой индуктивности одновитковых индукторов, особенно

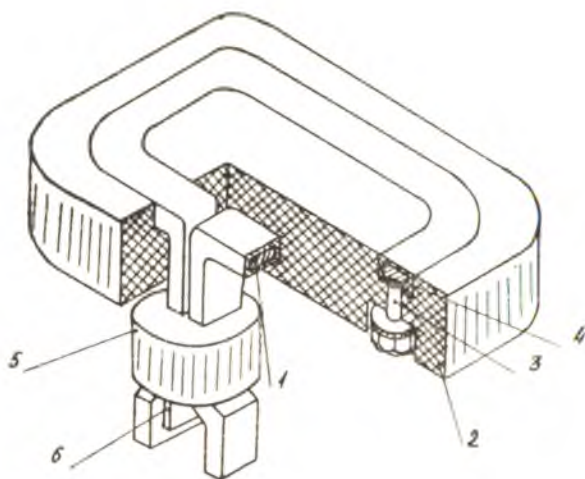


Рис. 4.5. Одновитковый индуктор для плоской листовой штамповки: 1 — токопровод, 2 — основание, 3 — шпилька, 4 — витковая изоляция, 5 — бандаж, 6 — прокладка

при небольшом размере рабочего витка (менее 50 мм), необходимо использовать более дорогую и сложную высокочастотную установку с малой собственной индуктивностью. Однако указанный недостаток можно устранить, если включить между установкой и индуктором кабельный или шинный трансформатор, но в этом случае существенно усложнится индукторная система. Поэтому одновитковые индукторы применяются ограниченно.

Многовитковые индукторы многократного действия гораздо сложнее в изготовлении и дороже, однако более эффективны в работе, чем одновитковые индукторы. Они позволяют получать различные давления при одной и той же величине запасаемой энергии и собственной индуктивности установки в результате изменения числа витков.

В индукторах для раздачи трубчатых заготовок часть разрядного тока протекает по внутренним слоям спирали (см. рис. 4.2) и не создает давления на деформируемую заготовку. В связи с этим эффективность раздачи по сравнению с обжимом труб снижается, что особенно заметно при уменьшении их диаметра.

Индукторы многократного действия должны обладать повышенной механической прочностью к ударным нагрузкам. Это требование приходит в противоречие со стремлением применять для их изготовления материалы с высокой электропроводно-

стью, а как известно, хорошие проводники обычно обладают низкой механической прочностью. В качестве материалов для спиралей индукторов многократного действия рекомендуют медь, бериллиевую бронзу, высокопрочные стали.

Прочность и долговечность индукторов в значительной мере зависят от механических свойств и типа изоляции, элементов механического усиления, работающих в условиях высоких температур и больших знакопеременных нагрузок.

В качестве изоляции витковой и главной применяются следующие материалы: термостойкие компаунды на основе эпоксидных смол, стекловолокнистые материалы, пропитанные жидкими лаками и компаундами, слоистые и пленочные пластики (стеклотекстолит, лавсановая пленка и др.). Толщина слоя изоляции между витками спирали индуктора зависит от шага навивки и равна 0,5—3 мм.

Толщина слоя главной изоляции между витками индуктора и поверхностью заготовки не должна превышать 0,5—1,5 мм, так как в противном случае увеличивается рассеивание магнитного потока и, следовательно, снижаются КПД и давление, действующее на заготовку.

Спираль цилиндрических индукторов изготавливается методом навивки или вытачивается из массивной заготовки. Оптимальной формой профиля сечения спирали является прямоугольная с закругленными кромками под радиус 1,5—2 мм. Намотка изоляционного материала производится на станке или вручную. Индукторы для плоской листовой штамповки выполняются с витками в виде спирали Архимеда (см. рис. 4.3). Спираль изготавливается из медной шины прямоугольного сечения методом навивки или фрезерованием из медной плиты и помещается в корпус с последующей заливкой изоляционным материалом. Перед навивкой спираль, как правило, обматывается несколькими слоями стеклопластиковой изоляции. Применение изоляции в виде сплошной заливки позволяет жестко фиксировать витки спирали и превращать индуктор в монолитную деталь.

К элементам механического усиления индукторов относятся корпус, оправки, основания, фланцы, бандажи, шпильки и т. д. (см. рис. 4.1, 4.2, 4.5). Элементы механического усиления изготавливаются из стали и пластмасс (баллиита, текстолита, эпоксидных компаундов с волокнистыми и сыпучими наполнителями — стеклоткань, стеклоленты, стекловолокна, кварцевой муки и т. д.).

Индукторы, предназначенные для работы в условиях многократности и большой частоты, повторяемости импульсов, должны иметь специальную систему охлаждения (см. рис. 4.2).

Необходимый тепловой режим работы индуктора может быть обеспечен охлаждением спирали индуктора сжатым воздухом или водой, пропускаемой через специальные каналы в индукторе. С применением охлаждения спирали особенно возрастает стойкость индукторов, работающих с большой частотой следования разрядов в течение длительного времени.

Предельная напряженность магнитного поля, которую можно достичь без разрушения спирали индуктора, определяется физико-механическими свойствами материала спирали [2].

Стойкость индуктора может быть достаточно высокой, если напряженность поля в индукторе не будет превосходить предельных значений для применяемого металла спирали.

Прочность индуктора может быть значительно повышена за счет увеличения массы витков, корпуса и применения элементов механического усиления спирали типа бандажей, стяжек и т. п.

Значительно увеличивается стойкость индукторов, если для обработки заготовок применяются концентраторы магнитного поля. Кроме того, концентраторы позволяют штамповать детали различных типоразмеров в одном индукторе, т. е. индуктор с концентраторами является универсальным. За счет концентраторов уменьшаются удельные давления на индуктор.

Схема индуктора 1 с концентратором 2 показана на рис. 4.6. Концентратор поля 2 представляет собой втулку из прочного высокоэлектропроводного металла. Втулка имеет центральное отверстие, образующее рабочий объем, в который вставляется обрабатываемая заготовка.

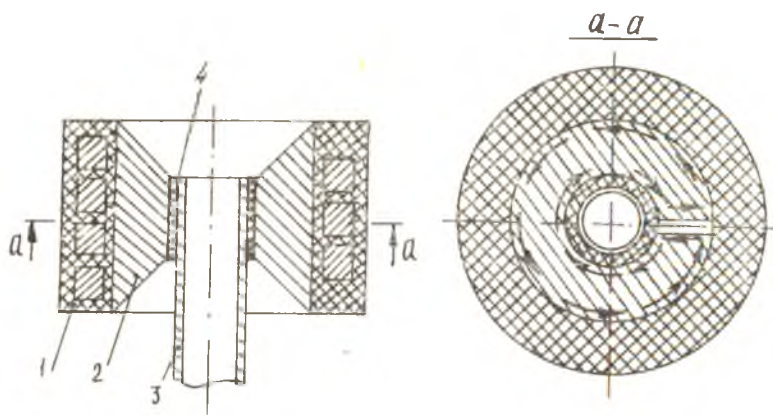


Рис. 4.6. Схема индуктора с концентратором на обжим: 1—индуктор, 2—концентратор, 3—трубчатая заготовка, 4—изоляционная втулка

Наружная поверхность концентратора является цилиндрической по форме индуктора, с которым она тесно соприкасается, внутренняя поверхность делается фасонной по форме обрабатываемой детали. Концентратор разрезан по образующей и разрез заполнен изоляцией. Толщина слоя изоляции 2—4 мм. Концентратор изолируется от заготовки 3 с помощью втулки 4.

Индуктор в сочетании с концентратором поля представляет собой воздушный трансформатор с многовитковой первичной обмоткой — (спираль индуктора) и одновитковой вторичной (концентратор поля).

При разряде электрической энергии на первичную обмотку переменное магнитное поле, образуемое в рабочем объеме индуктора, наводит вихревые токи на наружной поверхности концентратора, по радиальному пазу переходящие на внутреннюю поверхность центрального отверстия. Обычно длина центрального отверстия намного меньше длины наружной поверхности концентратора, вследствие чего поперечное сечение слоя, по которому наведенный ток обтекает внутреннее отверстие, значительно меньше наружного. Это приводит к увеличению плотности вихревых токов, а следовательно, и напряженности магнитного поля в этой части концентратора. Таким образом, достигается эффект концентрации магнитного поля на обрабатываемом участке заготовки.

С помощью концентраторов напряженность поля на обрабатываемом участке заготовки может в несколько раз превысить напряженность поля в области витков индуктора, что заметно снижает нагрузки на витки индуктора.

Возможность смены втулки — концентратора 2 (рис. 4.6) при переналадке индуктора придает ему универсальность в использовании для обработки деталей с размерами в определенном интервале.

В связи с усложнением конструкции и повышенном трудоемкости изготовления индукторов с концентраторами по сравнению с обычными индукторами рекомендуется их применение в среднесерийном, крупносерийном и массовом производстве. По данным печати за рубежом имеются индукторные системы с концентраторами магнитного поля стойкостью до 1 млн. разрядов. Однако при использовании таких индукторных систем теряется 30...40% энергии, передаваемой установкой в систему «индуктор—заготовка».

Большой эффективностью и прочностью обладает система, включающая импульсный согласующий трансформатор и одновитковый индуктор. При правильном использовании этой индукторной системы для обжима трубчатых заготовок потери энергии удастся свести к 10...20% [12].



## 5. УСТАНОВКИ ДЛЯ МИОМ

### 5.1. НАЗНАЧЕНИЕ, ПРЕИМУЩЕСТВА И УСТРОЙСТВО МИУ

Для магнитно-импульсной штамповки листовых деталей используются энергетические установки, выполненные в соответствии с принципиальной схемой метода (рис. 5.1). Они по своему назначению относятся к штамповочному оборудованию и располагаются в заготовительно-штамповочных цехах предприятий.

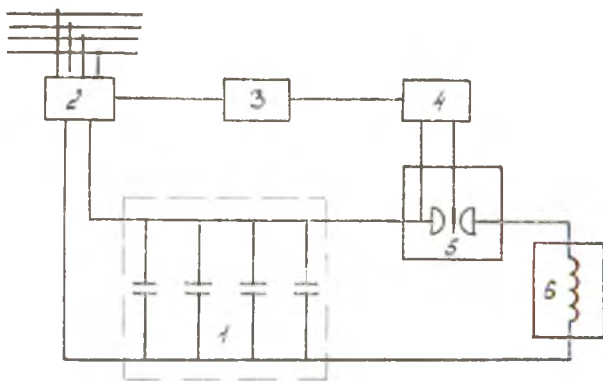


Рис. 5.1. Принципиальная схема магнитно-импульсной установки: 1 — аккумулятор энергии, 2 — зарядное устройство, 3 — система измерения напряжения и автоматики, 4 — блок поджига, 5 — разрядник, 6 — индуктор

МИУ имеют преимущества перед обычным штамповочным оборудованием:

наиболее универсальны, весьма компактны, малой высоты (максимум 2 м) и массы;

отдельные блоки установки могут находиться на различных расстояниях друг от друга, что обеспечивает безопасность работы оператора, позволяет легко встраивать технологический блок в конвейерную или автоматическую линию;

в установках отсутствуют подвижные части, что облегчает их изготовление, сборку, ремонт, а также обеспечивает отсутствие шума при работе;

не требуется фундамента, тяжелого литого корпуса или станины;

все блоки и элементы установок состоят из взаимозаменяемых и серийно выпускаемых деталей и узлов.

Магнитно-импульсные установки состоят из двух основных узлов: узла формирования и накопления электрической энергии — генератора импульсных токов и узла исполнительно-технологического блока, состоящего из индуктора, штамповочной оснастки, прижимного устройства [1].

Генератор импульсных токов предназначен для преобразования электрического тока промышленной частоты в импульсы тока большой амплитуды, которые образуются при разряде мощной батареи конденсаторов.

В промышленных магнитно-импульсных установках в состав генераторов импульсных токов входят следующие основные узлы: зарядное устройство, система измерения напряжения и автоматика, батарея конденсаторов, коммутирующее устройство — разрядник, блок поджига, ошиновка.

#### *Зарядное устройство*

Зарядное устройство состоит из повышающего трансформатора, высоковольтного выпрямителя и пускорегулирующей аппаратуры.

#### *Система измерения напряжения и автоматики*

Система измерения напряжения и автоматики включает измерительный делитель напряжения, блок измерительных приборов и автоматики и служит для контроля зарядки накопителя и автоматического управления запуском коммутирующего устройства.

#### *Батарея конденсаторов*

Батарея конденсаторов является накопителем энергии. В МИУ накопителями энергии являются импульсные конденсаторы, собираемые в батареи емкостью  $0,1-10^4$  мкФ и более. Применение специальных импульсных конденсаторов обусловлено их способностью отдавать накопленную энергию в виде коротких ( $10^{-6}-10^{-4}$  с) импульсов большой мощности.

Импульсные конденсаторы, применяемые в МИУ, должны обладать минимальной индуктивностью, чтобы повысить КПД процессов. Конструкция конденсаторов должна обеспечивать возможность длительной эксплуатации в режиме короткого замыкания, т. е. выдерживать большое число разрядных циклов.

Наибольшее применение в магнитно-импульсных установках нашли диэлектрические конденсаторы с высокой удельной энергоемкостью типов ИММ-5/150, ИМУ-5/140, ИМ-20/8, ИМ-5/150, КИМ-6-ХПИ, КБГП-4-16 и др. [5]. Обкладки конденсаторов выполняются из фольги, а наполнителем является трансформаторное масло. В металло-бумажных конденсаторах жидкий на-

полнитель не применяется, что позволяет устанавливать их в любом положении.

Для увеличения и повышения запасаемой мощности конденсаторы, образующие систему накопителя, соединяются в батареи последовательно, параллельно и последовательно-параллельно. Оптимальное соединение определяется требуемой рабочей характеристикой генератора импульсного тока.

Срок службы конденсатора зависит от величины максимального напряжения, до которого осуществляется его зарядка, времени нахождения конденсатора в заряженном состоянии, частоты следования импульсов зарядки и разрядки. При правильной эксплуатации современного металло-бумажного конденсатора в режимах, ниже предельных, срок его службы составляет несколько миллионов импульсов.

### *Коммутирующее устройство-разрядник*

Коммутирующие устройства или разрядники являются важными и ответственными узлами магнитно-импульсных установок. Они предназначены для иницирования разряда и подачи в заданный момент импульса напряжения на индуктор, пропускающего возникающего импульса тока за определенный отрезок времени и регулирования напряжения на конденсаторах. Разрядники должны производить управляемые разряды при различных уровнях напряжения установки.

Конструкция разрядника должна обеспечивать возможность регулирования рабочего напряжения до 10 кВ и более, пропускать значительные (до  $10^6$  А) токи, иметь малую собственную индуктивность и малое сопротивление, иметь малый разброс времени срабатывания и большой срок службы. Они должны обладать простотой конструкции и обслуживания.

В качестве разрядников в МИУ используются коммутирующие устройства — механические, игнитронные, дуговые.

Широкое применение в промышленных МИУ получили дуговые разрядники — тригatronы в трех вариантах конструктивного исполнения: открытые, вакуумные и газонаполненные разрядники, имеющие при небольшом межэлектродном расстоянии малую собственную индуктивность в широком диапазоне рабочих напряжений.

### *Блок поджига*

Блок поджига служит для подачи на вспомогательный электрод разрядника (тригatronа и игнитрона) иницирующего импульса для разряда предварительно заряженной батареи конденсаторов. Он выполняется по различным схемам [6].

## Ошиновка МИУ

Ошиновкой в конструкциях и схемах индукторов и МИУ являются соединительные проводники (шины), по которым производится передача токов и напряжений между отдельными элементами. Внутреннее сопротивление и индуктивность ошиновки должны быть минимальными, чтобы энергия, накопленная в конденсаторной батарее, наиболее полно передавалась индуктору.

Ошиновка выполняется из плоских медных шин или коаксиальных гибких кабелей небольшой индуктивности.

### 5.2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МИУ

В производстве применяются МИУ с энергоемкостью 3,5—80 кДж и выше. Основные типы магнитно-импульсных установок, эксплуатируемых в СССР, приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Основные типы МИУ в СССР

Тип установки	Разработчик	Энергоемкость, Кдж	Напряжение зарядки, кВ	Частота, кГц	Индуктивность, Н/и	Производительность, операций/ч	Площадь, м <sup>2</sup>	Масса, т
МИУ-3,5*	НИИТМАШ	3,5	5	39	60	300	0,48	0,35
МИУ-6/1	ХПИ	6	6			360	1,22	0,9
МИУ-10/5	ЭНИКМАШ	10	5	27,8		300	1,6	1,44
МИУ-10/20	ХПИ	10	21	65		340	0,95	0,72
УЭФ-10-5	ЧГУ	10	5	20	120	300	0,56	0,5
МИУ-15/5М	ЭНИКМАШ	15	5	36,5	20	240	3,5	2,0
МН-1	ХПИ	17,5	5	27	25	450	2,45	1,2
УМН-5/20	ЧГУ	19,25	5	18,6	60	300	3,4	2,1
УМШ-20/20	МЭИ-НИИТ	20	20	105	24	280	2,0	2,3
МИУ-20/5*	ЭНИКМАШ	20	5	25	28	300	3,0	2,6
МИУ-20/1*	ХПИ	20	21	60	78	360	2,55	2,4
МИУ-20/2*	ХПИ	20	20	60	80	360	2,63	2,54
МИУ-20/3	ХПИ	20	20	60	80	360	2,9	2,57
МИУ-20/ЧПР	ХПИ	20	20	60	80	360		1,60
МИУ-20/15	ХПИ	20	20	60	80	360	2,3	1,530
МИУ-20/6	ХПИ	20	20	60	80	360	2,0	1,50
УЭМЭШ-3	НИИТ	21	20	60	72	340		
МИУ-40/5*	ЭНИКМАШ	40	5	18	270	180	5,0	4,33
МИУ-60	КуАИ	60	10	8,7	250	180		
МИУ-80	ЭНИКМАШ	80	10			180		
МИУ-18/20	ЧГУ	20	18	54		360	3,0	2,7
МИУ-20/20	ЧГУ	20	20	40		360	2,1	2,2
МИУ-50/1	ХПИ	50	20	35		260		
МИУ-30	ХПИ	30	20	50		200		2,0

Примечание. \* — установки, изготавливаемые малыми сериями.

### 5.3. КОМПОНОВКА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МИУ

В зависимости от запасаемой энергии емкостного накопителя, схемного решения и назначения установки узлы МИУ могут комплектоваться в одном блоке с технологическим оборудованием либо в отдельных, конструктивно не связанных блоках.

Рабочий индуктор или технологический узел по условиям технологии может быть удален с помощью коаксиального кабеля от МИУ на расстояние 5 м и более.

На рис. 5.2 представлен общий вид установки МИУ-20/2 ХПИ. Установка состоит из трех блоков: блока емкостного накопителя, блока зарядного устройства, высоковольтной аппаратуры, коммутирующего устройства и технологического блока, в который входят передвижной стол, механические тиски (на переднем плане). Блоки установки можно удалять друг от друга на расстояние 2...3 метра.

На рис. 5.3 представлены установка МИУ-50/1 ХПИ в рабочем состоянии и отштампованные детали. На переднем плане виден технологический блок, состоящий из раздвижного прижимного устройства с двумя половинками матрицы и подключенного к МИУ цилиндрического индуктора.

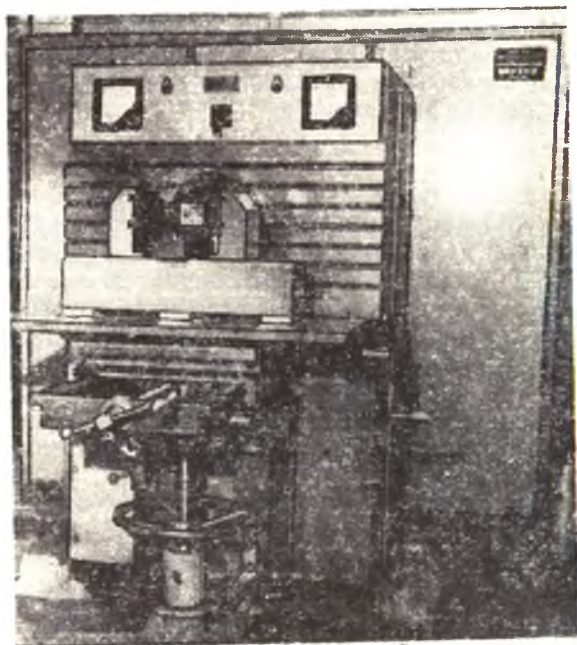


Рис. 5.2. Общий вид установки МИУ-20/2ХПИ

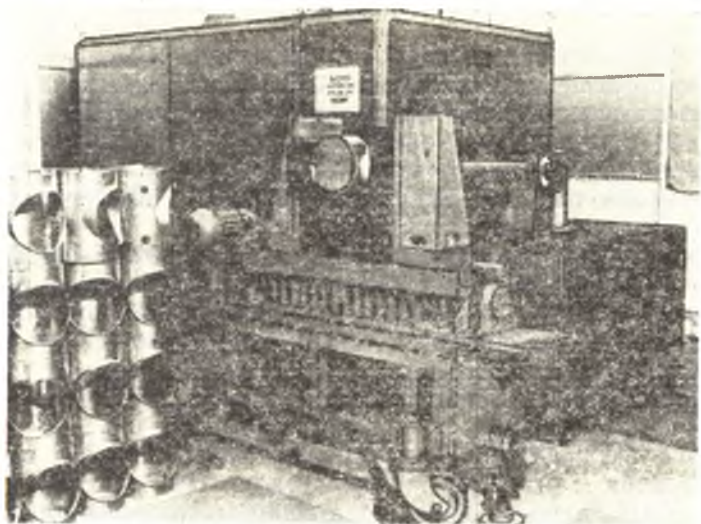


Рис. 5.3. Общий вид установки МИУ-50/1ХПИ в рабочем состоянии и отштампованные детали

Производительность МИУ зависит от скорости зарядки конденсаторов, величины запасаемой энергии и применяемых устройств для подачи заготовок в рабочую зону индуктора и прижима к штамповочной оснастке.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование импульсных методов штамповки листовых и трубчатых деталей характеризует новый этап в развитии технологии обработки металлов. В последние 15–20 лет МИОМ получила широкое применение в авиастроении, которое характеризуется почти всеми типами производства (от единичного до среднесерийного). Хотя МИОМ и является универсальным методом, но для получения большей эффективности его применения необходимо в каждом случае производить глубокий анализ технологических возможностей и экономической целесообразности его использования.

В нашей стране имеется значительное количество авиастроительных предприятий, оснащенных участками магнитно-импульсной обработки. Опыт работы показал, что при рациональном использовании оборудования этих участков по видам выполняемых операций и тщательно обработанной технологии обработки магнитно-импульсная штамповка обеспечивает получение высокой технико-экономической выгоды.

Более широкому внедрению магнитно-импульсной штамповки в производство препятствует ряд факторов, среди которых основным является малое количество выпускаемых установок для магнитно-импульсной обработки. Кроме того, существенным фактором являются также ограниченные познания технологов промышленных предприятий в теории и практике применения процессов МИОМ. Автор настоящего конспекта лекций поставил своей целью дать более широкое представление будущим заводским специалистам — технологам и конструкторам о теоретических основах процессов МИОМ и практическом применении в заготовительно-штамповочном производстве.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попцов Л. Я. Основы электротехнологии и новые ее разновидности// Библиотека электротехнолога. Л.: Машиностроение, 1971. Вып. 1. 216 с.
2. Карасик В. Р. Физика и техника сильных магнитных полей. М.: Наука, 1964. 348 с.
3. Высокоскоростное деформирование металлов/Под ред. Л. М. Шахназарова. М.: Машиностроение, 1966. 175 с.
4. Мансуров П. И., Попов В. С. Теоретическая электротехника. М.—Л.: Энергия, 1965. 388 с.
5. Степанов В. Г., Шауров Н. А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1975. 280 с.
6. Белый Н. В., Фертик С. И., Хилменко Л. Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Высшая школа, Харьков, 1977. 168 с.
7. Романовский В. И. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
8. Орленко Л. П. Поведение металлов при интенсивных динамических нагрузках. М.: Машиностроение, 1964. 168 с.
9. Лысенко Д. П., Розинский Б. М., Рыбакова Л. М., Хардин В. Б. Механические свойства и субструктура алюминиевых сплавов, пластически деформированных импульсным магнитным полем// Физика и химия обработки металлов. 1970. № 2.
10. Никитовников Р. В., Завьялова В. И. Штамповка листового металла врывом. М.: Машиностроение, 1964. 175 с.
11. Алексеев Ю. И. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием. Изд-во ХГУ, 1969. 108 с.
- Попов О. В. и др. Импульсные методы обработки металлов. Чуваш. ун-т. Чебоксары, 1982. 64 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Физические основы магнитно-импульсной обработки металлов	7
1.1. Электромагнитные явления в проводниках с током	7
1.2. Импульсное магнитное поле и его взаимодействие с металлической заготовкой	11
1.3. Схема осуществления и физическая сущность процесса магнитно-импульсной штамповки	13
1.4. Физические процессы в электрической сети магнитно-импульсной установки	15
1.5. Энергетические параметры и КПД процесса МИОМ	16
2. Конструктивно-технологические особенности деталей, изготавливаемых магнитно-импульсной штамповкой	20
2.1. Применение энергии ИМП в технологических целях и схемы обработки	20
2.2. Конструктивно-технологическая классификация деталей при МИОМ	25
2.3. Технологические операции магнитно-импульсной обработки и условия их выполнения	26
2.4. Технологические возможности процессов МИОМ и требования к обрабатываемым материалам и заготовкам	35
2.5. Механические свойства металлов и сплавов при динамическом нагружении	38
3. Разработка технологических процессов магнитно-импульсной штамповки	41
3.1. Методика разработки технологических процессов штамповки деталей	41
3.2. Определение величины запасаемой энергии в конденсаторной батарее, необходимой для штамповки	42
3.3. Определение работы деформации	42
3.4. Рабочая оснастка для МИОМ	45
4. Индукторы для магнитно-импульсной обработки	47
4.1. Назначение, устройство и классификация индукторов	47
4.2. Конструктивные и технологические особенности индукторов	51
5. Установки для МИОМ	57
5.1. Назначение, преимущества и устройство МИУ	57
5.2. Основные типы МИУ	60
5.3. Компоновка и производительность МИУ	61
Заключение	62
Библиографический список	63



*Геннадий Михайлович Лебедев*

МАШИНО-ИМПУЛЬСНАЯ ПЕЧАТОВАЯ МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ  
ПЕЧАТОВАЯ АППАРАТУРА

Редактор Т. К. Кретнича  
Техн. редактор П. М. Каленюк  
Корректор Е. С. Курирянова

Св. тем. план № 65

Сдано в набор 9.09.88 г. Подписано в печать 15.11.88 г.  
ГО 00324. Формат 60×84 1/16. Гарнитура литературная.  
Печать высокая. Усл. п. л. 3,5. Уч.-изд. л. 3,0.  
Г. 500 экз. Заказ 957. Цена 15 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королёва,  
413001, Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

---

Типография ЭОЗ Куйбышевского авиационного института  
413001, Куйбышев, ул. Ульяновская, 18