

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОТБОРТОВКИ  
НА ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЯХ

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве  
методических указаний  
к лабораторной работе № 2.4  
для студентов

Составитель доц. Г. М. Лебедев

УДК 621.7.044.7

*Исследование процессов магнитно-импульсной отбортовки на листовых деталях: Метод. указания /Сост. В. В. Скворцов; Куйб. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 20 с.*

В данных указаниях изложены физические основы магнитно-импульсной отбортовки листовых деталей и методика определения технологических параметров процесса штамповки.

Рекомендуется студентам специальности 0535 технологической специализации и ЦИПС.

Цель работы: ознакомление студентов с основными сведениями, сущностью и особенностями обработки металлов давлением с использованием энергии импульсного магнитного поля (ИМП), ее технологическими возможностями; закрепление знаний, полученных на лекциях; определение расчетным путем технологических параметров процесса отбортовки; изучение устройства оборудования и инструмента для МИОМ; экспериментальная проверка правильности определения потребной энергии для отбортовки детали; экспериментальное определение КПД магнитно-импульсной установки (МИУ) при отбортовке; экспериментальное изучение зависимости утонения заготовки от величины подведенной энергии.

Магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) — это прогрессивный электрофизический способ импульсного пластического деформирования металлов и сплавов, который как электрогидравлическая и взрывная обработка относится к высокоэнергетическим импульсным способам обработки. В настоящее время все три способа широко используются в машиностроении в опытном, мелкосерийном и серийном производстве. Они применяются при изготовлении деталей из листовых и трубчатых заготовок.

На занятия для выполнения лабораторной работы студенты должны приходиться подготовленными. Подготовленность студентов к работе и проверка полученных знаний после выполнения работы и оформления отчета производится по вопросам вводного и завершающего контроля. Контроль подготовленности к выполнению работы производится с помощью программно-контролирующего устройства типа «Огонек».

## *1. ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ*

1. Ознакомиться с методикой определения технологических параметров процесса отбортовки и методикой проведения эксперимента; изучить правила техники безопасности и охраны труда при работе на МИУ.

2. Рассчитать параметры техпроцесса магнитно-импульсной отбортовки отверстия или наружного контура заданной плоской детали. Размеры детали взять из таблицы (варианты задания вы-

даются преподавателем). При выполнении этой части лабораторной работы необходимо: выполнить образмеренный эскиз детали; определить размеры заготовки; выбрать и начертить схему процесса отбортовки; определить степень деформации при отбортовке и количество переходов; определить энергетические параметры процесса отбортовки.

Размеры деталей с отбортовками к вариантам и механические характеристики сплавов марок АМг6М и Д16АМ



Материал деталей марок — АМг6М и Д16АМ.

Ориентировочные механические характеристики сплавов с учетом коэффициентов динамичности: АМг6М [ $\sigma_{вд} = 400 \text{ МПа} \times (40 \text{ кгс/мм}^2)$ ;  $\sigma_{0,2д} = 220 \text{ МПа} (22 \text{ кгс/мм}^2)$ ;  $\delta_{рд} = 25 \%$ ;  $\psi_d = 44 \%$ ;  $n_d = 0,23$ ;  $K_d = 650 \text{ МПа} (65 \text{ кгс/мм}^2)$ ]; Д16АМ [ $\sigma_{вд} = 250 \text{ МПа} \times (25 \text{ кгс/мм}^2)$ ;  $\sigma_{0,2д} = 140 \text{ МПа} (14 \text{ кгс/мм}^2)$ ;  $\delta_{рд} = 20 \%$ ;  $\psi_d = 55 \%$ ;  $n_d = 0,2$ ;  $K_d = 430 \text{ МПа} (43 \text{ кгс/мм}^2)$ ].

Вариант	Размер				Вариант	Размер			
	D	h	r	s		d	h	r	s
1	50	10	3	1,0	8	80	11	3	1,0
2	80	14	3	1,0	9	100	13	3	1,0
3	100	18	4,5	1,5	10	120	14	3	1,0
4	120	18	4,5	1,5	11	150	16	4,5	1,5
5	150	20	4,5	1,5	12	180	18	4,5	1,5
6	180	21	4,5	1,5	13	200	20	4,5	1,5
7	200	22	4,5	1,5	14	250	22	4,5	1,5

3. Определить экспериментальным путем КПД магнитно-импульсной установки при отбортовке отверстия диаметром 100 мм (или 150 мм) или наружного контура диаметром 200 мм.

4. На основании эксперимента уточнить энергетические и электрические параметры техпроцесса отбортовки.

5. Провести замеры толщины стенки и борта на отштампованных деталях; подсчитать относительное утонение и дать оценку

зависимости утонения в опасном сечении от величины подведенной энергии.

6. Оформить отчет по лабораторной работе.
7. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

## *2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ*

### *2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ*

Магнитно-импульсная штамповка относится к категории высокоскоростных способов обработки материалов давлением. Применяется она в производстве летательных аппаратов для изготовления листовых и трубчатых деталей из труднодеформируемых алюминиевых, медных и других сплавов. Этим способом могут выполняться разделительные и формообразующие операции (вырубка, пробивка, раздача, обжим, формовка, калибровка), а также операции по созданию неразъемных соединений деталей [1, 2].

Способ магнитно-импульсной штамповки основан на непосредственном преобразовании накопленной электрической энергии в механическую работу. Механические усилия, необходимые для осуществления деформирования металлической заготовки, возникают в результате взаимодействия проводника (заготовки) с импульсным электромагнитным полем без участия каких-либо промежуточных твердых, жидких или газообразных сред. Силы, вызывающие деформирование, прикладываются к заготовке импульсивно, на время, измеряемое сотыми долями секунды, и производят действие, аналогичное взрыву [3]. Идея о возможности применения энергии импульсного магнитного поля высокой напряженности для технологических целей впервые была высказана советским ученым П. Л. Капицей в 1923 г., но первые опыты по практическому осуществлению магнитно-импульсной штамповки относятся к 1959—1960 гг. [4].

### *2.2. СУЩНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ*

При включении магнитно-импульсной установки (рис. 1) в сеть емкостный накопитель (батарея конденсаторов) 3 с помощью высоковольтного трансформатора 1 и выпрямителя 2 заряжается до напряжения, заданного регулятором запасаемой энергии 5. При достижении заданного напряжения на электрод поджига трехэлектродного разрядника 4 подается высоковольтный поджигающий импульс, который ионизирует пространство между

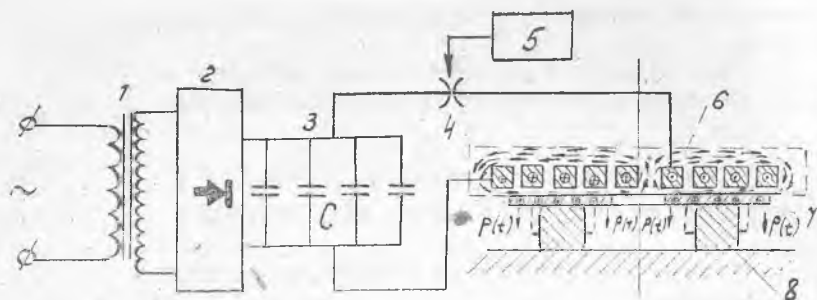


Рис. 1. Принципиальная схема установки для магнитно-импульсной штамповки

электродами разрядника и вызывает электрический пробой воздушного промежутка между ними. Запасенная в батарее конденсаторов энергия в виде импульса тока проходит через индуктор **б** и создает вокруг него мощное импульсное магнитное поле, индуктирующее в заготовке **7** вихревые токи (токи Фуко). Вихревые токи и токи в индукторе имеют противоположное направление. Взаимодействие мощного магнитного поля индуктора с вихревыми токами в заготовке и их магнитными полями вызывает механические силы отталкивания, производящие деформирование заготовки по матрице **8**.

Таким образом, при штамповке металлов с использованием энергии ИМП роль инструмента (пуансона или матрицы) выполняет магнитное поле, образующееся вокруг индуктора. Сила воздействия на заготовку пропорциональна количеству энергии, накопленной в конденсаторной батарее. Разряд происходит за 40...50 мкс, поэтому пластическое деформирование осуществляется мгновенно при электроэнергии огромной мощности. Вследствие этого достигается высокое давление до 4000 МПа (400 кгс/мм<sup>2</sup>). Длительность магнитного силового импульса во много раз меньше времени деформирования заготовки. Поэтому ИМП непосредственно действует на заготовку лишь в начальный момент, после чего дальнейшее деформирование заготовки происходит под действием полученного ею запаса кинетической энергии. В процессе деформирования заготовка под воздействием ИМП получает ускорение в несколько сотен тыс. м/с<sup>2</sup>, развивая к моменту контакта с матрицей скорость 50...300 м/с, поэтому процесс является высокоскоростным. Ввиду больших скоростей деформирования возникают инерционные силы, которые на первом этапе деформирования препятствуют деформации заготовки, а на последующих — способствуют ей.

Усилия воздействия магнитного поля на заготовку распределяются сравнительно равномерно по обрабатываемой площади и

объемно по толщине ее стенки. Однако в результате воздействия сил инерции и специфики нагружения заготовки внешними силами заметно изменяется напряженно-деформированное состояние заготовки по сравнению с пластическим деформированием в условиях статического нагружения.

Отсутствие непосредственного механического контакта рабочего инструмента — индуктора с заготовкой позволяет деформировать предварительно окрашенные, оксидированные или плакированные заготовки без нарушения их покрытия.

Для возможности наведения вихревых токов в деформируемой заготовке необходимо, чтобы заготовка имела замкнутый контур.

Кратковременность приложения нагрузки, высокие скорости деформирования обуславливают возможность изготовления оснастки из менее прочных материалов (малоуглеродистых сталей, текстолита, балинита, бетона и т. п.).

К особенностям МИОМ следует отнести также:

- а) возможность ведения процесса в вакууме, защитных средах;
- б) возможность обработки труднодеформируемых малопластичных металлов и сплавов;
- в) возможность совмещения различных операций: вырубки, пробивки, отбортовки, калибровки, чеканки и др.;
- г) универсальность оборудования, которому присущи небольшие размеры, масса и сравнительно низкие затраты на наладку;
- д) отсутствие сейсмичности;
- е) широкая управляемость процессом и гибкость регулировки силового воздействия на обрабатываемую деталь;
- ж) легкая автоматизация и механизация процесса и возможность включения его в существующие технологические линии;
- з) возможность сочетания силового и теплового воздействия при помощи основного рабочего тока и магнитного поля.

### *2.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МИОМ И ОГРАНИЧЕНИЯ*

По характеру деформирования заготовок МИОМ можно разделить на три основные технологические схемы: обжим трубчатых заготовок, раздача трубчатых заготовок и плоская листовая штамповка [4].

В первом случае спираль индуктора охватывает заготовку, и давление магнитного поля обжимает ее, во втором — индуктор находится внутри заготовки, и давление раздает ее. При плоской листовой штамповке индуктор находится над или под заготовкой, а с противоположной стороны помещается технологическая оснастка (матрица) (рис. 1).

Технологические возможности МИОМ необычайно широкие: может использоваться практически для выполнения всех операций

листовой штамповки, а также для прессования порошковых материалов, поверхностного упрочнения металлов, сборки, клепки, сварки, чеканки.

Наиболее перспективными направлениями МИОМ являются осуществление разделительных, формообразующих, калибровочных операций, а также сборочных операций. Осесимметричное давление магнитного поля позволяет получать неразъемные соединения даже деталей из разнородных материалов: металл-стекло, металл-керамика, металл-рези́на и т. д.

Механический КПД МИУ составляет 2...30% и зависит от многих факторов, в особенности от электропроводности материала обрабатываемой заготовки, ее геометрических размеров, конструкции индуктора и др.

Наиболее эффективно и просто магнитно-импульсное деформирование используется для материалов с высокой электропроводностью (медные, алюминиевые, магниевые сплавы и т. п.). Обработку металлов, электропроводность которых примерно в пять раз ниже электропроводности меди, рекомендуется производить с применением проводящей прокладки («спутника») из алюминиевых и медных сплавов.

На эффективность процесса большое влияние оказывает величина зазора между индуктором и заготовкой. Наибольшая сила воздействия на заготовку достигается при минимальном зазоре, равном 0,5...0,7 мм.

Верхний предел толщины стенки заготовки, обрабатываемой с помощью энергии ИМП, зависит от энергоемкости оборудования, удельного веса материала заготовки и стойкости индуктора.

Опыт внедрения МИОМ показал, что верхняя граница толщины стенки заготовки составляет: для меди и ее сплавов — до 4 мм, для алюминиевых сплавов — до 3 мм, для сталей (08 КП, 10, 20, Х18Н10Т и т. п.) — до 2 мм, для труднодеформируемых сталей и сплавов (титановых, жаропрочных, хромоникелевых и т. п.) — до 1,5 мм.

Нижний предел толщины стенки заготовки определяется исходя из электропроводности материала заготовки и матрицы, а также частоты разрядного контура МИУ.

Размеры заготовки (диаметр, обрабатываемая площадь) определяются толщиной ее стенки, энергоемкостью оборудования, конструктивными возможностями выполнения индуктора и технологической оснастки. Максимальный диаметр раздаваемых трубчатых заготовок, как правило, не превышает 4000 мм. Минимальный диаметр при раздаче трубы должен быть не менее 20...30 мм; при меньшем диаметре невозможно обеспечить соответствующую прочность индуктора.

Минимальный диаметр обжимаемой заготовки из цветных сплавов может быть равен 5 мм, а из стали 6...8 мм.



Обрабатываемая площадь листовых заготовок может достигать  $1\text{ м}^2$ .

Расширению технологических возможностей способа МИОМ способствуют такие присущие высокоскоростным процессам обработки металлов особенности, как увеличение пластичности деформируемой заготовки, более равномерное распределение деформаций по толщине стенки заготовки и более сильное, чем при статическом деформировании, уплотнение и упрочнение ее материала.

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;

если частота тока мала, то магнитное поле может проникнуть за заготовку и вызвать обратное давление (эффект «магнитной подушки»). Особенно часто это явление наблюдается при обработке металлов и сплавов с низкой электропроводностью (титана, нержавеющей сталей, жаропрочных сплавов) на установках с низкой собственной частотой разряда (менее  $30\text{ кГц}$ );

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

#### 2.4. УСТАНОВКА И ИНДУКТОРЫ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

Установка состоит из электрического и технологического блоков, а также блока управления параметрами разряда. Схема установки (см. рис. 1) 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 разряда конденсаторной батареи установки приблизительно выражается уравнением затухающего гармонического колебания

$$I = \frac{U}{L \omega} e^{-\frac{R}{2L} t} \sin \omega t,$$

где  $U$  — напряжение заряда конденсаторной батареи;

$L$  — индуктивность контура разряда;

$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$  — круговая частота колебаний разрядного тока;

$R$  — активное сопротивление контура разряда;

$t$  — время разряда;

$C$  — емкость конденсаторной батареи;

$f$  — частота разрядного тока.

Характер изменения тока во времени показан на рис. 2. Очевидно, что механические силы (давление магнитного поля) будут тем больше, чем больше амплитуда тока в разрядной цепи  $I$  и чем ближе к индуктору расположена заготовка.

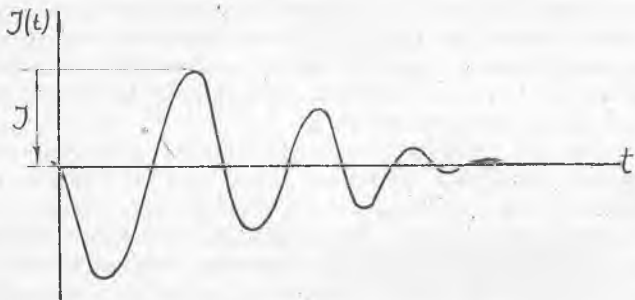


Рис. 2. Характер изменения тока во времени

Для обеспечения эффективной работы магнитно-импульсной установки необходимо, чтобы внутренняя индуктивность контура разряда установки  $L_{вн}$  (разрядника, ошиновки, конденсаторной батареи), а также активное сопротивление  $R_{вн}$  были как можно меньше.

Запасаемая в конденсаторной батарее энергия  $E$  расходуется на образование магнитного поля индуктора  $E_{и}$ , а также на образование паразитных магнитных полей и активные потери в разрядной цепи установки  $E_{пот}$ :  $E = E_{и} + E_{пот}$ .

Энергия, запасаемая в конденсаторной батарее, определяется из выражения

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (\text{мкФ} \cdot \text{кВ} = \text{Дж}).$$

Энергия магнитного поля индуктора

$$E_{и} = \frac{L_{и} I^2}{2}.$$

Энергия паразитных магнитных полей и активные потери

$$E_{пот} = \frac{L_{вн} I^2}{2} + \int R_{вн} i^2 dt.$$

Таким образом, эффективность магнитно-импульсной установки тем выше, чем меньше внутренняя индуктивность и активное сопротивление цепи разряда.

Уменьшение индуктивности  $L_{вн}$  установки очень важно не только для повышения энергии магнитного поля индуктора, но и для получения достаточно высокой частоты колебаний тока раз-

ряда  $f$ , чтобы глубина проникновения поля в заготовку была меньше толщины заготовки.

Индуктор — главный рабочий инструмент МИУ, состоит из токопроводящей спирали, изоляции токопровода и элементов механического усиления [4]. Конструкция, форма рабочей поверхности и размеры индуктора зависят от назначения и параметров обрабатываемого объекта. Индукторы, в общем случае, подразделяются на постоянные (многоцветные) и разрушающиеся (одноразовые). Стойкость постоянных (многоцветных) индукторов достигает порядка 1...3 тысяч разрядов.

Основным элементом индуктора считается токопроводящая спираль, форма которой определяет конфигурацию магнитного поля. Спираль изготавливается навивкой из медной шины или вытачивается из цельной заготовки из материалов с высокой электропроводностью для снижения потерь на нагрев. В значительной мере надежность и долговечность индуктора зависят от качества применяемой изоляции, которая должна обладать высокой электрической и механической прочностью.

Для механического усиления спирали индуктора применяются специальные бандажы, стяжки, корпуса и т. п.

Для увеличения КПД индуктора его форма должна быть близка к форме обрабатываемой заготовки. С этой целью используются специальные экраны, вставки, концентраторы магнитного поля, которые увеличивают местную напряженность магнитного поля во много раз по сравнению с напряженностью на других участках спирали.

В зависимости от выполняемой операции и схемы обработки различают три вида индукторов: для обжима, для раздачи трубчатых заготовок и для плоской листовой штамповки.

## *2.5. ОТБОРТОВКА ОТВЕРСТИЯ И НАРУЖНОГО КОНТУРА С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГИИ ИМП*

В настоящей лабораторной работе исследуются процессы плоской штамповки.

К плоской штамповке относятся технологические операции, выполняемые с помощью спирального плоского индуктора. Обрабатываемая листовая заготовка размещается между индуктором и матрицей, имеющей форму штампуемой детали (рис. 3 и 4).

Отбортовкой отверстия называют процесс образования борта вокруг предварительно пробитого отверстия в плоском или полом изделия, производимый за счет растяжения металла (см. рис. 3).

Отбортовкой наружного контура называют процесс образования невысокого борта по наружному криволинейному выпуклому

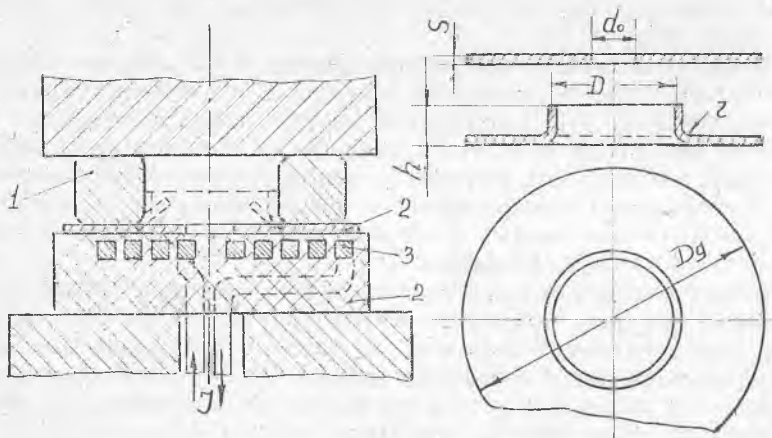


Рис. 3. Схема процесса отбортовки отверстия с использованием энергии ИМП: 1—матрица, 2—заготовка, 3—спираль индуктора; 4—корпус индуктора

(или вогнутому) краю заготовки, производимый за счет сжатия (или растяжения) материала (см. рис. 4).

Отбортовка отверстий и наружных контуров широко применяется в производстве летательных аппаратов для повышения жесткости деталей, а также для их соединения при помощи сварки или клепки с другими элементами различных конструкций (не-

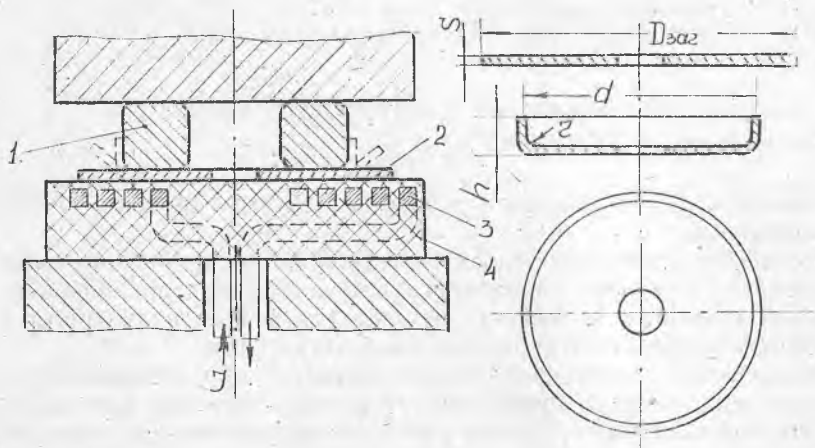


Рис. 4. Схема процесса отбортовки наружного контура с использованием энергии ИМП: 1—матрица, 2—заготовка, 3—спираль индуктора, 4—корпус индуктора

рворами крыла и оперения, перегородками и донышками баков и др.). Характерными деталями, на примере которых выполняется настоящая лабораторная работа, являются фланец и крышка, получаемые соответственно из круглых листовых заготовок отбортовкой отверстия и наружного контура.

Отбортовка отверстий и наружных контуров с помощью энергии ИМП производится на упрощенной штамповочной оснастке по схемам, приведенным на рис. 3 и 4.

В процессе разряда батареи конденсаторов МИУ под воздействием магнитного поля, возникающего в индукторе, участки заготовки, расположенные под отверстием матрицы или за наружным контуром матрицы, отталкиваются от рабочей поверхности индуктора и за счет гибки-формовки принимают вертикальное положение, копируя форму жесткой матрицы. Очагом деформации как в первом, так и во втором случае является деформируемый борт, причем материал борта находится в плосконапряженном (растяжение в радиальном и тангенциальном направлениях борта отверстия, растяжение в радиальном и сжатие в тангенциальном направлениях борта наружного контура) и объемно-деформированном состоянии. При отбортовке отверстия материал борта претерпевает утонение, а при отбортовке наружного контура — может несколько и утолщаться. Опасным сечением в первом случае является кромка борта отверстия заготовки. При отбортовке наружного выпуклого контура за счет действия инерционных сил радиально-растягивающее напряжение имеет наибольшую величину у кромки матрицы. Эта зона является опасной, и при неблагоприятных условиях отбортовки здесь может произойти разрушение материала заготовки (обрыв борта).

Степень деформации при отбортовке отверстия определяется отношением диаметра отверстия в заготовке  $d_0$  к диаметру борта (по средней линии)  $D$  или так называемым коэффициентом отбортовки отверстия:

$$K_0 = D/d_0. \quad (1)$$

Коэффициент отбортовки наружного контура определяется отношением диаметров средней поверхности отштампованного борта  $d$  к диаметру заготовки  $D_{\text{заг}}$ :

$$K_n = d/D_{\text{заг}}. \quad (2)$$

Чем больше абсолютное значение  $K_0$  и меньше  $K_n$ , тем большую деформацию претерпевает материал. Коэффициенты  $K_0$  и  $K_n$ , при которых отбортовка происходит с наиболее полным использованием пластических свойств материала, но без образования трещин по краю борта при отбортовке отверстий и без появления неразглаженных складок на поверхности борта, при отбортовке наружных контуров являются предельно допустимыми (оптимальными).

Предельно допустимые коэффициенты  $K_0$  и  $K_n$  находят экспериментальным путем в зависимости от механических свойств испытуемого материала, от относительной толщины заготовки, выраженной отношением  $s/d_0 \cdot 100$  или  $s/D_{\text{заг}} \cdot 100$ , от состояния кромок отверстия в заготовке (наличие или отсутствие заусенцев), от относительного радиуса гибки  $r/s$ .

При магнитно-импульсной штамповке, сравнивая расчетные значения коэффициентов отбортовки изготавливаемых деталей с предельными коэффициентами отбортовки (рис. 5 и 6), можно определить возможность осуществления отбортовки за один или несколько переходов.

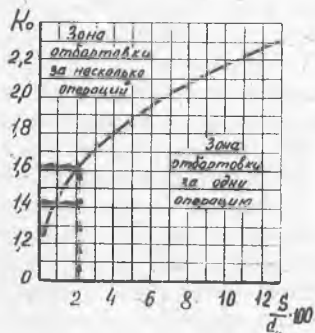


Рис. 5. Зависимость предельного коэффициента отбортовки отверстия от относительной толщины материала  $K_0$  при  $f(s/d_0 \cdot 100)$  для материалов Д16АМ и АМг6М

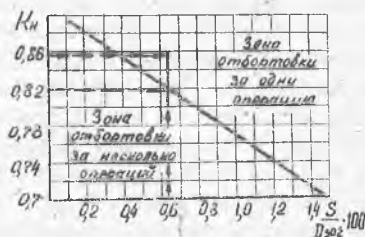


Рис. 6. Зависимость предельного коэффициента отбортовки наружного контура от относительной толщины материала  $K_n$  при  $f(s/D_{\text{заг}} \cdot 100)$  для материалов Д16АМ и АМг6М

Существенное значение при разработке технологических процессов отбортовки имеет расчет энергетических параметров, а также определение размеров заготовки.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ТЕХПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

#### 3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ

Размеры заготовки при отбортовке отверстий и наружных контуров для деталей, приведенных в таблице 1, можно достаточно точно определить из условий равенства поверхностей заготовки и

готовой детали. Диаметр отверстия под отбортовку определяется по формуле

$$d_0 = D - 2(h - 0,432r - 0,72s), \quad (3)$$

где  $D$  — диаметр отбортовки отверстия по средней линии;  $h$  — высота борта;  $r$  — внутренний радиус гибки;  $s$  — толщина материала заготовки.

Диаметр диска под отбортовку наружного контура рассчитывается по формуле

$$D_{\text{заг}} = \sqrt{d^2 + 4dh - 1,72dr_1 - 0,56r_1^2}, \quad (4)$$

где  $r_1 = r + s/2$ ;  $d$  — диаметр отбортовки наружного контура по средней линии;  $h$  — высота борта.

### 3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОТБОРТОВКЕ

Для проверки возможности осуществления отбортовки за одну операцию необходимо подсчитать потребный коэффициент отбортовки детали по формулам (1) и (2) и сравнить его с предельными. Удобно воспользоваться графиками  $K_{0\text{нпр}} = f(s/d_0 \cdot 100)$ ;  $K_{\text{нпр}} = f(s/D_{\text{заг}} \cdot 100)$ , которые получены экспериментально и представлены на рис. 5 и 6. Если  $K_0 < K_{0\text{нпр}}$  и  $K_{\text{н}} > K_{\text{нпр}}$  по абсолютной величине в зависимости от  $s/d_0 \cdot 100$  и  $s/D_{\text{заг}} \cdot 100$ , то отбортовки можно производить за одну операцию.

### 3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОТБОРТОВКИ

#### 3.3.1. Расчет работы деформации при отбортовке

Для определения энергетических параметров технологического процесса штамповки листового металла при высокоскоростном деформировании удобно пользоваться энергетическим методом расчета. Полная работа деформации заготовки подсчитывается как произведение удельной работы деформации на весь объем деформированной части заготовки:

$$A = a_i V. \quad (5)$$

Удельная работа деформации, совершаемая напряжениями при переходе элемента тела единичного объема материала заготовки из недеформированного состояния в деформированное, определяется по формуле

$$a_i = \frac{K}{1+n} e_i^{1+n}, \quad (6)$$

где  $K$  и  $n$  — постоянные для данного материала величины, харак-

теризующие интенсивность упрочнения (значения при расчете взяты из таблицы);  $e_i$  — интенсивность деформаций.

При практических расчетах, когда схема деформированного состояния близка к плоской или одноосному растяжению (отбортовка отверстия и наружного контура), можно считать, что интенсивность деформации близка к наибольшей деформации, т. е.  $e_i = e_1$ , а так как обычно в различных участках штампуемых деталей величина деформации имеет разное значение, то при расчете удельной работы деформации по формуле (6) необходимо пользоваться средними величинами  $e_{i\text{cp}}$  или  $e_{i\text{cp}}$ :

Для расчета работы деформации фланца и крышки объем деформированной части каждой детали условно разделяется на два участка: цилиндрический кольцевой участок борта, материал которого претерпевает деформацию растяжения — раздачу при отбортовке отверстия и деформацию сжатия — посадку при отбортовке наружного контура, и кольцевой участок с торовой поверхностью на стыке стенки и борта детали, материал которого претерпевает изгиб. Средняя интенсивность деформации растяжения и сжатия материала борта соответственно при отбортовке отверстия и наружного контура определяется по формуле

$$e_{i\text{cp}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{R}{h} \ln \frac{R}{R+h} + 1 \right), \quad (7)$$

где  $R = \frac{d_0 + s}{2}$  — для отбортовки отверстия при раздаче материала борта;

$R = \frac{D_{\text{нар}} - s}{2}$  — для отбортовки наружного контура при посадке материала борта.

Объем деформируемого материала подсчитывается по формулам:

$V = \pi Dsh$  — для отбортовки отверстия при раздаче материала борта,

$V = \pi dsh$  — для отбортовки наружного контура при посадке материала борта.

Величина средней деформации при гибке заготовки на кромке матрицы при отбортовке отверстия и наружного контура определяется по формуле

$$e_{i\text{cp}} = \frac{s}{4(r + s/2)}. \quad (8)$$

Объем деформируемого материала изгибаемого участка заготовки подсчитывается по формулам:

$V = \frac{\pi}{2} \left[ \pi D \left( r + \frac{s}{2} \right) + 2,28 \left( r + \frac{s}{2} \right)^2 \right] s$  — при отбортовке отверстия — раздаче материала борта;



$V = \frac{\pi}{2} \left[ 2\pi (d - 2r - s)r + 8 \left( r + \frac{s}{2} \right)^2 \right] s$  — при отбортовке наружного контура — посадке материала борта.

Затем последовательно по формулам (5) и (6) определяются величины удельной работы деформации  $a_i$ , работы деформации отбортовки  $A_{отб}$ , гибки  $A_{гиб}$  и суммируются:  $A = A_{отб} + A_{гиб}$ . Расчет работы деформации при отбортовке ведется в Нм.

### 3.3.2. Расчет потребной энергии зарядки емкостного накопителя и рабочего напряжения МИУ для отбортовки

Величина потребной энергии зарядки батареи конденсаторов установки в Дж подсчитывается по формуле

$$E = \frac{A}{\eta},$$

а рабочее напряжение установки в кВ — по формуле

$$U = \sqrt{\frac{2E}{C}},$$

где  $C$  — емкость конденсаторной батареи МИУ (мкФ);  $\eta$  — механический коэффициент полезного действия установки.

При отбортовке многовитковыми индукторами на МИУ-20, МИУ-40 экспериментально установлено  $\eta = 6,5 \dots 14 \%$ .

## 4. ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНАСТКА И ПРИБОРЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Для проведения экспериментальных исследований могут быть использованы установки: МИУ-20 ( $E_{\max} = 20$  кДж,  $U_{\max} = 21$  кВ,  $C = 78$  мкФ,  $L_{уст} = 0,254$  мкГн) и МИУ-40 ( $E_{\max} = 40$  кДж,  $U_{\max} = 10$  кВ,  $C = 908$  мкФ,  $L_{уст} = 0,402$  мкГн). Основные узлы МИУ — зарядное устройство, батарея конденсаторов, разрядное устройство, ошиновка, блок управления или поджига, система защиты и блокировок. Запасаемая энергия регулируется задатчиком. Контроль напряжения зарядки батареи конденсаторов производится вольтметром.

В качестве инструмента для отбортовки используется стальная матрица с наружным диаметром 200 мм или с отверстием диаметром 100 или 150 мм (радиусы ребра матрицы  $r_m = 4,5$  мм), а также плоский многовитковый индуктор. Для прижима заготовки к матрице и индуктору применяется зажимное приспособление, которое устанавливается на столе МИУ.

Замеры толщины заготовок и стенок отформованных деталей

производятся с помощью спецприспособления с индикаторными часами.

Учитывая, что к работе на МИУ могут быть допущены лица, сдавшие техминимум по эксплуатации высоковольтных установок (IV группа), эксперименты по магнитно-импульсной штамповке студенты должны выполнять с оператором-электриком. При этом все работы, связанные с подготовкой образцов и их метрологическими исследованиями, выполняют студенты, а подготовку установки к работе, выполнение рабочего разряда и обесточивание узлов установки — оператор.

### *5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕХАНИЧЕСКОГО КПД УСТАНОВКИ ПРИ ОТБОРТОВКЕ*

1. Ознакомиться с конструкцией МИУ, правилами ее эксплуатации и требованиями техники безопасности (данные материалы приведены в паспорте установки).

2. Получить у лаборанта три заготовки в виде колец для проведения исследования с наружным диаметром 232 мм и отверстием диаметром 70 мм из материала Д16АМ (или АМг6М) толщиной 1,5 мм. Проверить маркировку материала, диаметры отверстий и диаметры наружных контуров.

3. Пронумеровать заготовки цифрами 1, 2, 3 и измерить толщину исходных заготовок; замеры толщины занести в протокол исследования.

4. Заготовку и матрицу (с  $D_{\text{отв}} = 100$  мм,  $r_m = 4,5$  мм или  $d_{\text{н.к}} = 200$  мм;  $r_m = 4,5$  мм) установить на индуктор по центровой бобышке и произвести прижим к плоскости индуктора в зажимном приспособлении.

5. Определение оптимальной потребной энергии отбортовки вести опытным путем на трех образцах методом подбора, задаваясь энергией формообразования. Энергию зарядки для формовки первого образца ориентировочно взять из расчета варианта 3 или 13 таблицы. Величины  $U$  и  $C$  для штамповки первого образца внести в задание оператору установки. Влияние количества подведенной энергии на качество отбортовок оценивать визуально. В случае неполной штамповки борта первого образца энергию МИУ для штамповки второго и третьего образцов следует увеличить на одно деление шкалы задатчика и наоборот, если борт не прилегает к поверхности матрицы и на его кромке видна светлая полоска, т. е. борт ударился о матрицу и отскочил, энергию штамповки следующих образцов следует уменьшить на одно деление шкалы задатчика. Таким образом, экспериментально определяется величина потребной энергии отбортовки.

6. Оператору подготовить МИУ к работе, произвести рабочие разряды по заданию студентов-исследователей, обесточить узлы установки.

7. Механический КПД определить по формуле

$$\eta = \frac{A}{E} 100 \%$$

Работу деформации  $A$  брать расчетную, а величину оптимальной потребной энергии  $E$  из эксперимента. Полученный КПД сравнить с используемым в расчете.

8. Измерить толщину борта, стенки и радиусных переходов на детали, отштампованной при оптимальной энергии. Измерение толщины борта производить в трех точках: у края борта, по середине высоты  $h$  и у радиуса перехода ( $s_1, s_2, s_3$ ). Толщину стенки измерить у радиуса перехода и на расстоянии 10 мм от радиуса перехода ( $s_5, s_6$ ). Толщину стенки в радиусном переходе замерить в его средней точке ( $s_4$ ) (рис. 7):

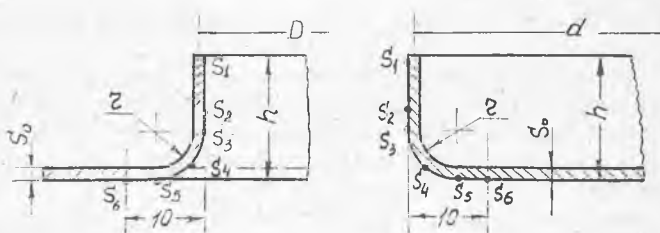


Рис. 7. Схема замера толщины отштампованных деталей

9. Подсчитать относительное утонение борта и стенки детали в процентах на основании выполненных замеров и найти опасное сечение. Утонение подсчитывается по формуле

$$\Delta s \% = \frac{s_0 - s_i}{s_0} 100 \%$$

где  $s_0$  — толщина заготовки до деформации,  $s_i$  — толщина заготовки после деформации.

10. Определить утонение в опасном сечении на других двух образцах и дать оценку зависимости утонения в опасном сечении от величины подведенной энергии при отбортовке.

11. Уточнить параметры электрического разряда с учетом механического КПД, полученного экспериментальным путем. Произвести определение потребной энергии зарядки и рабочего напряжения установки.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема установки (см. рис. 1); эскиз заданной детали со всеми размерами, схема процесса отбортовки.
2. Формулы расчета параметров техпроцессов магнитно-импульсной штамповки.
3. Результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований (в таблице).
4. Эскиз сечения отштампованного образца с указанием толщины материала в исследуемых точках (см. рис. 7).
5. Выводы по работе.

### ВОПРОСЫ ВВОДНОГО КОНТРОЛЯ

1. Чем вызвана необходимость разработки и промышленного применения высокоскоростных способов штамповки?
2. На каком физическом явлении основан способ магнитно-импульсной штамповки?
3. Физическая сущность процесса магнитно-импульсной штамповки.
4. Какими параметрами характеризуется процесс МИОМ?
5. Почему МИОМ относится к высокоскоростным процессам?
6. Какую роль играют инерционные силы при МИОМ?
7. Как распределяется усилие магнитного поля на заготовке при МИОМ?
8. Какие преимущества имеет МИОМ по сравнению с обработкой деталей в инструментальных штампах при статическом нагружении?
9. Какие преимущества у МИУ по сравнению с обычными прессами?
10. Какие применяются основные схемы деформирования деталей при МИОМ?
11. Технологические операции, выполняемые при МИОМ.
12. Величина КПД процесса МИОМ. От каких факторов зависит КПД процесса при МИОМ?
13. Какие ограничения необходимо учитывать при разработке процессов МИОМ?
14. Области применения данного метода. Чем вызваны трудности обработки металлов и сплавов с низкой электропроводностью?

### ВОПРОСЫ ЗАВЕРШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

1. Какое влияние оказывает на процесс отбортовки коэффициент отбортовки  $K_0$  и  $K_n$ ? Какие факторы влияют на величину  $K_{пр}$ ?

2. Какое влияние оказывает на процесс отбортовки и качество деталей величина подведенной энергии?

3. Какие принципы положены в основу определения размеров заготовок при отбортовке?

4. Какие факторы влияют на величину КПД установки?

5. Как рассчитывается работа деформации при отбортовке и энергия штамповки?

6. Как определить экспериментальным путем механический КПД установки при штамповке деталей?

7. Рассказать о конструкции магнитно-импульсной установки для штамповки листовых деталей.

8. Какие основные правила техники безопасности необходимо соблюдать при эксплуатации МИУ?

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов В. Г. Шавров И. А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. — Л.: Машиностроение, 1975. — 275 с.

2. Горбунов М. Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов. — М.: Машиностроение, 1981. — 224 с.

3. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. — М.: Машиностроение, 1979. — 420 с.

4. Лебедев Г. М. Магнитно-импульсная штамповка деталей летательных аппаратов: Конспект лекций. — Куйбышев: КуАИ, 1988. — 64 с.

Составитель *Геннадий Михайлович Лебедев*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОТБОРТОВКИ  
НА ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЯХ

Редактор Т. К. К р е т и н и н а  
Техн. редактор Н. М. К а л е н ю к  
Корректор Н. С. К у п р и я н о в а

Сдано в набор 15.02.88 г. Подписано в печать 15.03.88 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная. Печать высокая.  
Гарнитура литературная. Усл. п. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,0. .  
Т. 600 экз. Заказ 256. Бесплатно.

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