

деформации ε_n и ε_m также являются функциями коэффициента формоизменения κ , при этом с увеличением коэффициента κ функции $\varepsilon_n = f(\kappa)$ (зависимости 28 и 30) монотонно возрастают от 0 при $\kappa = 1$ до ∞ . При $\kappa = 1,3$ величина ε_n составляет 0,176 при холодной деформации и 0,184 при горячей, т. е. утонение оболочки составляет примерно 20% от толщины исходной заготовки.

Функции $\varepsilon_m = f(x)$ (зависимости 27 и 29) имеют максимум: $\varepsilon_{m \max} = 0,110$ при $\kappa = 1,74$ для холодной деформации и $\varepsilon_{m \max} = 0,088$ при $\kappa = 1,41$ для горячей. При $\kappa = 1,3$ величина ε_m составляет соответственно 0,086 и 0,078.

Приведенные зависимости установлены для случая деформирования оболочек, материал которых с достаточной степенью приближения можно считать изотропным. Напряжения и деформации при этом являются функцией только коэффициента формоизменения.

На основании зависимостей, установленных в настоящей работе, определяются основные параметры технологии формообразования оболочек внутренним давлением газовой, жидкой или эластичной среды — величина технологических припусков, величина необходимого давления, максимальное утонение оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильюшин Л. А., Ленский В. С. Сопротивление материалов. М., Физматгиздат, 1959.
2. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. «Высшая школа», 1963.

Г. М. Лебедев, Г. З. Исарович, Л. С. Вислова, Д. Н. Лысенко

ИЗЫСКАНИЕ ИНДУЦИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

При штамповке импульсным магнитным полем (ИМП) деталей из листовых заготовок в качестве рабочего инструмента применяются плоские индукторы, представляющие собой сложные электромагнитные системы (рис. 1). Конструкция и форма рабочей поверхности индукторов могут быть разнообразными. Выбор конструкции существенно влияет на технологические возможности процесса обработки.

Для получения сильных магнитных полей при научных исследованиях различных явлений в области физики давно используются импульсные соленоиды или индукторы [1]. Однако по ряду причин разработанные ранее конструкции индукторов оказались непригодными для обработки металлов с использованием энергии ИМП.

В настоящее время индукторы для обработки металлов давлением еще недостаточно изучены. В технической литературе мало опубликовано сведений о конструкции, параметрах и принципах расчета индукторов, применяемых для различных операций штамповки. Интересные сведения по индукторам для штамповки листовых заготовок имеются в работах [2, 3].

Индукторы работают в довольно сложных условиях: при значительных нагрузках динамического характера, высоком напряжении в интервале 5, 10, 20 и даже до 50 кв, а также при высоких температурах — от $50 \div 100^\circ$ и до $200 \div 350^\circ\text{C}$. Поэтому создание надежного работающего индуктора многократного действия оптимальной конструкции представляет собой сложную конструкторскую и технологическую задачу.

Перед авторами стояла задача разработать конструкции индукторов для выполнения операций гибки, отбортовки отверстий и наружных контуров в листовой штамповке. В связи с этим был проведен критический анализ ряда известных конструкций индукторов и проделана большая поисковая работа по разработке конструкций и способов изготовления плоских индукторов для формообразования листовых заготовок одинарной и двойной кривизны.

В результате было получено несколько оригинальных конструкций индукторов, а также необходимые сведения и опыт по конструированию, изготовлению и эксплуатации плоских индукторов.

На основе полученных сведений можно провести укрупненную классификацию плоских индукторов по конструктивно-технологическим признакам. Как известно, существуют плоские индукторы, постоянные (многократного действия) и разового действия.

Постоянные плоские индукторы могут быть многовитковыми (рис. 1) и одновитковыми (рис. 2).

По назначению индукторы подразделяются на универсальные и специальные. Универсальные служат для штамповки группы деталей, близких по форме, конфигурации и размерам. Специальные индукторы предназначаются для изготовления отдельных конкретных деталей.

В настоящее время нашли применение стационарные и переносные плоские индукторы. Стационарные индукторы для выполнения штамповочных операций подсоединяются и закрепляются непосредственно на рабочем столе магнитно-импульсной установки. Переносные индукторы — магнитные молоты — подсоединяются к установке посредством гибкого кабеля значительной длины (5—10 м). Штамповка с помощью переносных индукторов применяется для правки крупных деталей и узлов после штамповки или сварки, а также для обработки труднодоступных мест на деталях больших размеров, которые не помещаются на столе стационарной магнитно-импульсной установки [4, 5].

Многовитковые индукторы по форме укладки спирали токо-

провода подразделяются на индукторы со спиралью Архимеда, биполярной и бифилярной спиралью.

Токосоводящие элементы индуктора могут выполняться без концентратора магнитного поля и с концентратором. Соответственно с этим различают индукторы без концентратора и индук-

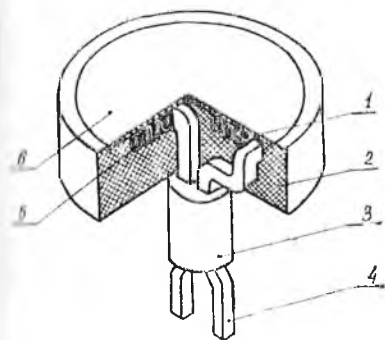


Рис. 1. Многовитковый плоский индуктор:

- 1— токопроводящая спираль; 2— корпус;
- 3— механическое усиление токоподводов;
- 4— токоподводы; 5— витковая изоляция;
- 6— главная изоляция

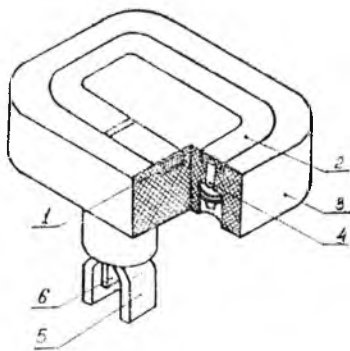


Рис. 2. Одновитковый плоский индуктор:

- 1— токопроводящая спираль; 2— изоляция;
- 3— корпус; 4— шпильки; 5— токоподводы;
- 6— прокладка изоляционная

торы с концентраторами. С эксплуатационной точки зрения индукторы могут выполняться без системы охлаждения и с охлаждением.

Многовитковые индукторы в целом подразделяются на индукторы с точеной спиралью и индукторы со спиралью, навитой по оправке из специальных профилированных, обычно прямоугольных по сечению, медных шин (см. рис. 1). Это деление обусловлено не только разными технологическими процессами изготовления индукторов. Оно также связано с обеспечением их механической прочности.

Плоские индукторы могут отличаться друг от друга также формой сечения витка, типом и конструкцией изоляции, конструкцией и способом изготовления механического усиления, формой рабочей поверхности, системой охлаждения и т. д.

Главным элементом индуктора является токопроводящая спираль. Ее форма и конфигурация в плане определяют рабочую поверхность индуктора. Рабочая поверхность спирали индуктора, как правило, должна с эквидистантным зазором повторять форму обрабатываемой поверхности заготовки. Желательно, чтобы этот зазор был минимально возможным, он практически зависит от толщины главной изоляции и составляет величину порядка $0,5 \div 3,0 \text{ мм}$. В свою очередь, толщина изоляции зависит от ее качества.

Конструкция токопроводящей спирали характеризуется следующими параметрами: числом витков, формой укладки, сече-

нием витка. Выбор этих параметров спирали во многом определяет конструкцию индуктора, его технологические особенности и эффективность.

Многовитковые спирали значительно отличаются от одновитковых по конструкции, способу изготовления и механическому усилению, а также по эюуре давления магнитного поля.

В настоящее время широкое применение нашли многовитковые индукторы со спиралью Архимеда (по типу рис. 1) и одновитковые индукторы (по типу рис. 2). Индукторы с биполярной спиралью применяются там, где необходимо сконцентрировать давление магнитного поля в центре заготовки. Бифилярные спирали в связи с низкой эффективностью находят ограниченное применение. Индукторы с концентраторами применяются, в основном, там, где зона обработки настолько мала, что разместить нужное число витков затруднительно или даже невозможно, а применение одновиткового индуктора ограничено из-за большой внутренней индуктивности энергетической установки.

Наилучшими материалами для изготовления спиралей являются медь и ее сплавы. Спираль индуктора может быть выполнена из отфрезерованной (точеной), биметаллической (точеной или гнутой из высокопрочной стали с покрытием из меди или другого высокопроводящего сплава) или из специальных профилированных медных шин.

Работоспособность, надежность и долговечность индуктора зависят, в первую очередь, от качества и стойкости его изоляции. Изоляция индуктора разделяется на главную (6) и витковую (5) (см. рис. 1). В связи с тем, что электромагнитные силы действуют на плоскую токопроводящую спираль, витки воспринимают, в основном, сжимающие усилия. Распределение усилий по высоте сечения спирали неравномерно. В верхних слоях, обращенных к обрабатываемой детали, действуют большие усилия. В результате неравномерного распределения усилий по сечению возникают крутящие моменты, которые стремятся повернуть сечение шины токопроводящей спирали относительно его оси.

Высокие нагрузки, действующие на индуктор, при наличии зазоров между витками и перекосов витков нередко приводят к смещению и деформации шины токопроводящей спирали, в итоге происходит повреждение и разрушение главной и межвитковой изоляции. Кроме того, изоляция воспринимает воздействие всего приложенного напряжения емкостного накопителя магнитно-импульсной установки и теплового от тепловыделения, передающегося от спирали индуктора. Это концентрированное воздействие на изоляцию комплекса неблагоприятных факторов и приводило к частому выходу индукторов из строя из-за электрического пробоя.

Для повышения электрической и механической стойкости индукторов необходимо обеспечить достаточную прочность и жесткость токопроводящей спирали путем изготовления ее из би-

металла (медь—сталь), крепления к корпусу через арматуру (рис. 2).

В связи с тем что эффективность индуктора сильно зависит от величины зазора между индуктором и заготовкой, снижаясь при его увеличении, толщина главной изоляции должна быть минимальной. Это обуславливает применение в качестве главной изоляции материалов с наибольшей электрической и высокой механической прочностью. Кроме того, изоляция должна иметь теплостойкость не ниже 200°C и быть достаточно эластичной и механически прочной.

В настоящее время не удалось найти материал, удовлетворяющий комплексу указанных требований, что привело к необходимости изготовления изоляции из комбинации различных электроизоляционных материалов. В качестве изоляции применяются следующие материалы: теплостойкие компаунды на основе эпоксидных смол, обладающие высокой механической и электрической прочностью; стекловолоконистые материалы, пропитанные жидкими лаками и компаундами; слоистые и пленочные пластики.

Однако, как показывает опыт, применение высококачественных материалов для изоляции не обеспечивало электрическую прочность индукторов без специальных мероприятий по повышению монолитности и обеспечению надежного механического усиления индукторов. Для этого при навивке спирали необходимо укладывать медную изолированную шину плотно — виток к витку с определенным натяжением, не допускать образования зазоров между витками и перекосов витков. Усилие натяжки зависит от сечения спирали и составляет примерно 10÷20 кг.

К элементам механического усиления плоских индукторов относятся корпуса, опоры, шпильки и болты для крепления спирали и т. п. (см. рис. 1, 2). Механическое усиление предназначено для увеличения механической прочности токопроводящей спирали, токопроводов и других элементов индуктора. Элементы механического усиления индуктора должны иметь такую конструкцию и расположение, чтобы предотвращать возможные, даже небольшие, перемещения и деформацию спирали под действием электромагнитных сил отталкивания со стороны заготовки.

Динамичность нагружения индуктора является неблагоприятным обстоятельством и для работы механического усиления. Элементы механического усиления воспринимают все действующие нагрузки при упругих или упругопластических деформациях токопроводящей спирали индуктора, поэтому они должны обладать достаточной прочностью и жесткостью при соединении их с другими элементами индуктора. Зазоры и неплотности в соединении недопустимы не только после изготовления индуктора, но и их возникновение в процессе эксплуатации индуктора. Для этого все болтовые соединения должны устанавливаться с необходимой затяжкой, и гайки должны надежно контриться.

Элементы механического усиления изготавливаются из стали

и пластмасс (бальзита, текстолита, эпоксидных компаундов и волокнистыми и сыпучими наполнителями и др.).

Одним из видов разрушения плоских индукторов является так называемое расслоение механического усиления 2 (рис. 1.), сопровождающееся возникновением круговых трещин на наружной цилиндрической поверхности корпуса. Плоскость трещины параллельна плоскости витков спирали. Другим наиболее часто встречающимся видом разрушения является выпучивание витков архимедовой спирали в центре, в сторону заготовки.

Эти особенности механического разрушения индукторов указывают на наличие волновых явлений при распределении напряжений в его элементах.

Для увеличения стойкости корпуса индуктора против трещин и расслоения необходимо обеспечивать большую монолитность корпуса, например, путем намотки усиливающих колец на боковую поверхность из стекловолокна с пропиткой эпоксидным компаундом. Наибольшую стойкость против импульсных нагрузок, волновых и тепловых явлений показали корпуса индукторов, изготовленные из эпоксидных смол с армированием стеклолентой.

Чтобы предотвратить выпучивания витков спирали, их крепят к корпусу. Шины укрепляют с помощью винтов или приваренных шпилек, которые устанавливаются с шагом 40—80 мм (рис. 2). Применение шпилек или винтов для крепления спирали многовитковых индукторов не всегда возможно из-за небольшого сечения витков и технологических трудностей при сборке с корпусом.

Для подвода электрической энергии от магнитно-импульсной установки к токопроводящей спирали в конструкцию индуктора включаются специальные элементы — токоподводы. Возможны различные конструктивные варианты токоподводов: коаксиальные, двухпроводные некоаксиальные и др. Наиболее широкое применение в конструкциях плоских стационарных индукторов получил токопровод двухпроводный некоаксиальный 2 (рис. 1) и 5 (рис. 2).

Минимальная индуктивность, простота конструкции и надежность в работе — основные требования, предъявляемые к токопроводам.

Токоподводы индукторов изготавливаются в виде прямоугольных медных шин. Следует учитывать, что чем больше ширина токоподводов, короче и ближе друг к другу они расположены, тем меньшую индуктивность они имеют. Уменьшение индуктивности повышает к. п. д. индуктора. В случае необходимости токоподводы изготавливаются увеличенной длины (до 1500 мм). Между шинами токоподводов устанавливается, например, изоляция 6 (рис. 2), толщина которой зависит от рабочего напряжения. Для надежной работы индуктора необходимо сочетание правильной конструкции и достаточно прочного механического усиления токоподводов. На стационарных индукторах хорошо

рекомендовало себя механическое усиление 3 (рис. 1), изготовляемое намоткой стеклоткани с пропиткой эпоксидным компаундом.

При выборе конструкции индуктора необходимо учитывать следующие основные факторы: форму и размеры обрабатываемой заготовки, режим изготовления детали, вид операции и масштаб производства.

Проведенная поисковая научно-исследовательская работа показала, что для операций гибки и отбортовки целесообразно применять многовитковые, а также одновитковые индукторы. Следует учитывать, что к. п. д. многовитковых индукторов примерно в два раза выше, чем у одновитковых. Установлено, что для операций отбортовки отверстий с помощью многовитковых индукторов к. п. д. составляет $5 \div 6,5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карасик В. Р. Физика и техника сильных магнитных полей. М., «Наука», 1964.
2. Попов Е. А., Поляк С. М., Столбунов А. С. и др. Деформирование металла импульсным магнитным полем. Часть I и II. М., ж. «Кузнечно-штамповочное производство», 1956, № 5, 6.
3. Белый И. В. и др. Применение магнитно-импульсной обработки металлов давлением в заводских условиях. Научно-производственный сборник «Технология и организация производства». Киев, 1967, № 3.
4. Магнитно-импульсный молоток для сглаживания деформаций после сварки. № 47, 1964.
5. Developments in Magnetomotive forming and a new concept — magneto-hydraulic forming. 1956. № 18. «Design and Compon Enging».

Г. М. Лебедев, Г. З. Исарович, Л. С. Вислова,
Ю. М. Овчинников

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СИСТЕМЕ «ИНДУКТОР—ЗАГОТОВКА» И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ВЕЛИЧИНЫ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТА

В технологических процессах магнитно-импульсной штамповки характерной величиной, определяющей формоизменение заготовки, является давление магнитного поля, воспроизводимое системой «индуктор—заготовка». Величина давления магнитного поля в значительной степени определяет скорость деформирования заготовки и конечные параметры процесса формообразования.

При изучении процессов высокоскоростного деформирования важно знать не только величину силового воздействия магнитно-