

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-

го поля на заготовку, но и распределение его в обрабатываемой зоне и изменение во времени [1, 2, 3]. От характера распределения давления магнитного поля зависит обеспечение оптимальной кинематики процессов пластического формообразования и качественная оценка систем «индуктор — заготовка».

Значительная часть исследований по гибке-штамповке и отбортовке проводилась с одновитковыми индукторами. Поэтому задачей экспериментального исследования было изучение характера распределения давления магнитного поля в одновитковых индукторах и определение оптимальных схем нагружения плоских заготовок в процессах гибки, отбортовки отверстий и наружных контуров. Предпочтение, отданное одновитковым индукторам, связано с тем, что в производстве деталей преобладает гибка и отбортовка сравнительно невысоких бортов (порядка $5 \div 20$ мм) и применение многовитковых индукторов затруднено из-за сложности размещения нужного числа витков определенной конфигурации на малой ширине борта и обеспечения механической и электрической прочности индукторов. Кроме того, как показывает опыт, конструкция одновитковых индукторов значительно проще и трудоемкость их изготовления примерно в 2 раза ниже, чем многовитковых. К достоинству одновитковых индукторов следует отнести их высокую механическую и электрическую прочность. Однако одновитковые индукторы эффективно работают, когда магнитно-импульсная установка имеет небольшую внутреннюю индуктивность, а длина токопроводов имеет небольшую величину.

В общем случае характер распределения давления магнитного поля зависит от многих параметров: электропроводности штампуемого материала, частоты разрядного контура, размера и конфигурации токопроводящей спирали, расположения заготовки относительно индуктора (зазора между индуктором и заготовкой, величины смещения заготовки относительно индуктора) и др. Изменение электропроводности материала заготовки и изменение частоты разрядного контура приводят к изменению глубины проникновения магнитного поля в заготовку (толщина «скин-слоя»), что может быть учтено изменением эффективного зазора между индуктором и заготовкой.

Таким образом, в работе исследовался характер распределения давления магнитного поля и величина давления в зависимости от зазора между индуктором и заготовкой, от величины смещения края заготовки относительно спирали индуктора в горизонтальной и вертикальной плоскости (угла гибки) и от ширины спирали токопровода индуктора.

Расчет импульсного магнитного поля связан с большими математическими трудностями, так как точное аналитическое решение в большинстве случаев получить не удастся. Поэтому в настоящее время широкое распространение получили различные экспериментальные методы определения величины давления магнитно-

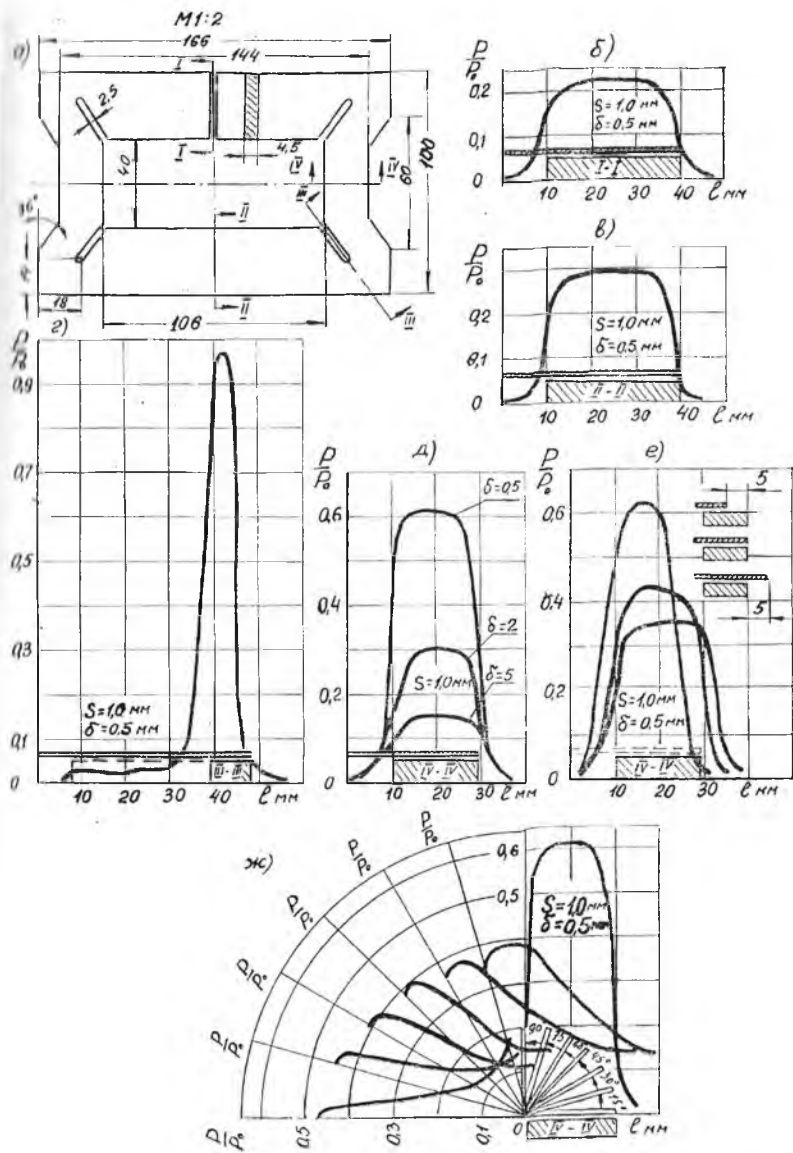


Рис. 1. Конфигурация и размеры спирали плоского одновиткового индуктора для гибки прямолинейных бортов и графики распределения давления магнитного поля в относительных величинах $\frac{P}{P_0}$ в системе «индуктор — заготовка»

го поля [1, 3, 4]. Наиболее апробированными являются: метод определения величины давления магнитного поля в определенной точке индуктора через напряженность магнитного поля, измеренную в этой точке [1, 4], и метод экспериментального построения распределения давления по известному закону изменения тока разряда во времени путем моделирования на физической модели [3]. Методика определения давления изложена в работе [5].

Исследования проводились в основном на трех одновитковых индукторах: индукторе для гибки двух параллельных прямолинейных бортов высотой до 25 мм и длиной 100 мм (конфигурацию и размеры спирали индуктора см. на рис. 1а), индукторе для отбортовки отверстия диаметром 150 мм (наружный диаметр спирали 150 мм, размер сечения шины спирали 20×4,5 мм), индукторе для отбортовки наружного контура диаметром 200 мм (наружный диаметр спирали 240 мм, размер сечения шины спирали 20×4,5 мм). Для исследования влияния ширины спирали гофрировочного индуктора на величину и характер распределения магнитного поля были изготовлены три одновитковых индуктора, у которых внутренний диаметр шины спирали был равен 124 мм, а ширина сечения различная — 15×4,5 мм; 20×4,5 мм, и 30×4,5 мм. Конструкция всех индукторов типовая.

Заготовки применялись из сплава АМг6М и Д16АМ толщиной 0,5; 1,0; 1,5; 2 и 5 мм. Форма и размеры заготовок подбирались в зависимости от поставленной задачи эксперимента.

Зазор между индуктором и заготовкой устанавливался с помощью прокладок из листового стеклотекстолита толщиной 0,2; 0,5; 1,0; 2; 3 и 5 мм.

Измерения напряженности магнитного поля проводились на модельной установке, спроектированной и изготовленной в лаборатории № 11 КуАИ [5].

Результаты исследования характера распределения давления магнитного поля на плоском одновитковом индукторе для гибки двух бортов представлены на рис. 1. Конфигурация спирали индуктора (рис. 1а) была получена при экспериментальной обработке процесса гибки. Измерения напряженности магнитного поля осуществлялись с заготовкой размером 100×145 мм из материала АМг6М толщиной 1,0 мм.

Как видно из графиков (рис. 1 б, в, г, д), характер распределения давления магнитного поля по ширине шины спирали индуктора близок к симметричному расположению, а величина давления зависит от ширины шины l (см. сечения I—I, II—II, III—III и IV—IV). Давление магнитного поля на плоскую заготовку в центральной зоне сечения ширины спирали может быть принято равномерным, а на краях сечения шины оно резко падает. Однако зона эффективного давления магнитного поля превышает ширину шины спирали. Наибольшая величина давления магнитного поля получена в самом узком сечении III—III (рис. 1—2), где плотность тока максимальная. В зоне расположе-

ния выводов индуктора (см. сечение I—I, рис. 1, б) давление магнитного поля ниже на $10 \div 20\%$, чем в других сечениях спирали.

Изменение величины давления магнитного поля на заготовку в зависимости от величины зазора показано на рис. 1 д. Из анализа зависимостей следует, что увеличение зазора между заготовкой и спиралью индуктора сопровождается резким падением величины давления магнитного поля. При зазоре, равном $\delta = 0,5$ мм, величина давления магнитного поля на заготовку в 2,4 раза выше, чем при зазоре, равном $\delta = 5$ мм.

На рис. 1, е представлены графики по изучению влияния смещения заготовки относительно спирали индуктора в сечении IV—IV на характер распределения давления магнитного поля. Анализ графиков показывает, что смещение края заготовки относительно внешнего контура спирали индуктора приводит к изменению габаритов силового поля. Площадь же эиоры силового поля остается неизменной. Например, выдвижение края заготовки на 5 мм относительно внешнего контура спирали ведет к расширению эиоры силового поля и к повышению давления примерно на 20%. При сдвиге края заготовки на 5 мм во внутреннюю сторону спирали индуктора эиора силового поля сужается и увеличивается давление примерно на 45%. В зоне спирали индуктора, не экранированной заготовкой, давление магнитного поля резко падает.

В процессе гибки борта на плоской заготовке происходит значительное перераспределение давления магнитного поля по поверхности заготовки. Это наглядно подтвердили эксперименты по исследованию влияния угла гибки на величину и распределение давления магнитного поля. На рис. 1, ж представлены зависимости $\frac{p}{p_0}$ (относительное давление магнитного поля) от ширины l при углах гибки, равных 15, 30, 45, 60, 75, 90°. С увеличением угла гибки борта зазор между спиралью индуктора и заготовкой возрастает, величина давления магнитного поля падает. Зона максимального давления сужается и перемещается в область радиуса гибки. Такое явление способствует резкому падению давления на большей площади отгибасмого борта по мере увеличения угла гибки.

Распределение давления магнитного поля в сечениях индуктора с круглой одновитковой спиралью несколько отличается по сравнению с индуктором, у которого спираль имеет прямоугольную форму. Например, на рис. 2, а показаны графики распределения $\frac{p}{p_0}$ в трех сечениях: I—I, II—II и III—III круглого одновиткового индуктора с внутренним диаметром спирали 124 мм сечением $20 \times 4,5$ мм. На графиках виден четко выраженный максимум $\frac{p}{p_0}$, который заметно смещен в сторону внутреннего диа-

метра спирали индуктора. Это можно объяснить тем, что в круглых спиралях при прохождении тока плотность его выше на внутренней поверхности, так как ток стремится течь по кратчайшему пути. В связи с этим величина давления магнитного поля на внеш-

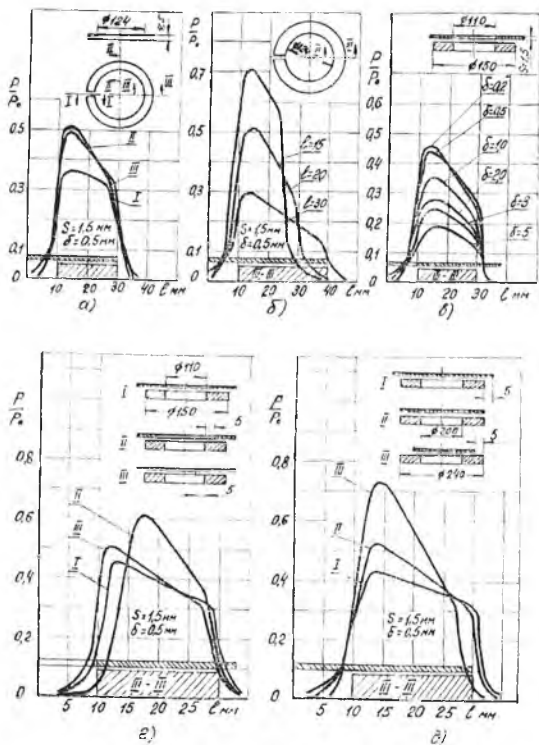


Рис. 2. Графики распределения давления магнитного поля в относительных величинах $\frac{P}{P_0}$ в системе «индуктор—заготовка» при отбортовке круглых отверстий и наружных контуров

нем крае сечения токопроводящей спирали примерно на 40% ниже, чем на внутреннем. В сечении I—I, расположенном в зоне токопроводов, величина давления ниже, чем в других сечениях, примерно на 10 ÷ 20%.

На рис. 2, б показаны графики распределения давления магнитного поля по сечению III—III для индукторов с шириной швы спирали 15, 20 и 30 мм. Анализ графиков показывает, что с уменьшением ширины швы спирали с 30 до 15 мм величина $\frac{P}{P_0}$ возрастает более чем в 2 раза.

Проведенные исследования распределения давления магнитного поля в индукторах с круглой спиралью (с внешним диаметром 150 и 240 мм) в зависимости от величины зазора (рис. 2, в) подтвердили общую закономерность, установленную на индукторе для гибки прямолинейных бортов. С увеличением зазора между спиралью индуктора и заготовкой падает напряженность магнитного поля и резко уменьшается давление.

Существенное влияние на распределение давления магнитного поля оказывает расположение края заготовки относительно контура спирали индуктора при отбортовке. Например, смещение края заготовки на 5 мм во внешнюю сторону спирали индуктора при отбортовке отверстия диаметром 150 мм (рис. 2, г, II) и во внутреннюю сторону при отбортовке наружного контура диаметром 200 мм (рис. 2, д, III) приводит к сужению зоны силового поля и увеличению значения $\frac{p}{p_0}$ в месте максимума примерно на 30%. В случае смещения края заготовки на 5 мм во внутреннюю сторону спирали индуктора при отбортовке отверстия диаметром 150 мм (рис. 2, г, III) и во внешнюю сторону при отбортовке наружного контура диаметром 200 мм (рис. 2, д, I) происходит соответственно повышение давления в месте максимума на $8 \div 10\%$ и уменьшение примерно на 20%. Такое перераспределение зоны давления магнитного поля можно объяснить изменением плотности тока в спирали индуктора по мере уменьшения или увеличения размеров заготовки.

Экспериментальные исследования также показали, что увеличение толщины заготовок из сплавов Д16 и АМг6М с 0,5 до 5 мм не оказывает существенного влияния на величину и распределение давления магнитного поля. При такой толщине проникновение магнитного поля через заготовку незначительно, поэтому в описываемых опытах им можно пренебречь.

Величина давления магнитного поля на заготовку определялась методом непосредственного измерения напряженности в процессе разряда на магнитно-импульсной установке по формуле

$$P = \frac{\nu_0 H^2}{2},$$

где $\nu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м — магнитная постоянная вакуума;

H — напряженность магнитного поля в исследуемой точке; и методом физического моделирования по формуле

$$P_{\max} = \left(\frac{P}{P_0}\right) \frac{\nu_0}{2} \left(\frac{n \cdot I}{a}\right)^2,$$

где n — число витков индуктора;

I — амплитудное значение тока;

a — ширина токовой полосы индуктора.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало

их хорошую сходимость. Расхождение полученных результатов не превышало $10 \div 25\%$.

В таблице приведена величина максимального давления магнитного поля на заготовку для трех процессов при номинальных режимах: гибки прямого борта, отбортовки отверстия диаметром 150 мм и отбортовки наружного контура диаметром 200 мм.

Наименование операции	Гибка прямолинейного борта	Отбортовка отверстия $\varnothing 150$ мм	Отбортовка наружного контура $\varnothing 200$ мм
Индуктор	Одновитковый индуктор, спираль $A \times B = 166 \times 100$ мм	Одновитковый индуктор, спираль $D \times d = 150 \times 110$ мм	Одновитковый индуктор, спираль $D \times d = 240 \times 200$ мм
Материал заготовки	АМг6М-л1,0	АМг6М-л1,5	АМг6М-л1,5
Максимальное давление магнитного поля, P_{\max} н/м ²	$0,8 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^7$	$6,2 \cdot 10^7$

Таким образом, полученные графики распределения давления магнитного поля в одновитковых индукторах позволяют правильно выбрать геометрические параметры индукторов при заданных габаритах обрабатываемых деталей. Для получения давления с минимальными потерями необходимо стремиться к обеспечению равномерного зазора между индуктором и заготовкой порядка 0,5 мм и менее при сохранении механической и электрической прочности главной изоляции. Рабочая поверхность спирали индуктора должна перекрывать контур заготовки на 3—5 мм. При гибке борта в связи с резким перемещением контура действующего силового поля на заготовку в зону радиусагиба рабочая поверхность спирали с внутренней стороны должна ограничиваться контуром формовочного блока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карасик В. Р. Физика и техника сильных магнитных полей. М., 1964.
2. Швейерсон Г. А. Получение сильного импульсного магнитного поля в сплошных одновитковых соленоидах малого объема. ЖТФ, XXXII, вып. 9, 1962.
3. Техника высоких напряжений. Труды МЭИ, вып. 64, 1966.
4. Piekara A., Malecki I. Akta Physik Polonica, 15, 381, 1956.
5. Овчинников Ю. М., Лебедев Г. М., Исарович Г. З. и др. О методике определения давления магнитного поля плоских индукторов при импульсной обработке. В сб. «Вопросы технологии производства летательных аппаратов». Труды КуАИ, вып. 41, 1970.