

ВЛИЯНИЕ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

© 2008 Ю. Е. Паламарчук, А. Н. Кирилин, В. М. Вершигорев

ФГУП ГНП РКЦ “ЦСКБ-Прогресс”

Приведены результаты исследований, связанных с реализацией эффективной технологии магнитно-импульсной обработки. Повышение эффективности процессов связано с оптимизацией передачи энергии в цепи разряда и превращения давления импульсного поля в работу деформации и кинетическую энергию заготовки. Приведены основные выражения, позволяющие оценить величину потерь энергии, запасаемой в конденсаторах установки, при её передаче в работу деформации заготовки.

Импульсные магнитные поля, штамповка, индукторные системы, коэффициенты перегрузки, деформации детали

Процессы магнитно-импульсной штамповки характеризуются наличием высоких скоростей деформирования материалов, тепловыми эффектами, влияющими на пластичность обрабатываемых материалов, а также магнитным воздействием на структуру материалов. Электрическая энергия, накопленная в батарее конденсаторов магнитно-импульсной установки, затрачивается на каждый из приведённых эффектов и, следовательно, на к.п.д. процесса. Индикаторные системы оказывают наиболее существенное влияние на эффективность передачи энергии от установки в работу деформации заготовки и, следовательно, на эффективность процесса в целом. Для процессов магнитно-импульсной штамповки это является сокращением энергозатрат, необходимых при моделировании процессов и для выполнения данной операции. Энергию заряда установки, необходимую для выполнения заданной операции, можно представить в виде

$$W_P = P_{m0} S D_{\text{экв}} \frac{I}{K_1 K_2 K_3 K_4}, \quad (1)$$

где P_{m0} - амплитудное значение давления магнитного поля; S - площадь поверхности заготовки; $D_{\text{экв}}$ - эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой; K_1 - коэффициент, численно равный доле индуктивной энергии системы установка - “индуктор-заготовка”, передаваемой в систему “индуктор-заготовка”; K_2 - коэффициент, учитывающий умень-

шение давления магнитного поля к моменту достижения первого максимума разрядного тока вследствие омических потерь в разрядном контуре; K_3 - коэффициент, учитывающий степень неоднородности магнитного поля в зазоре между индуктором и заготовкой; K_4 - коэффициент, учитывающий уменьшение давления из-за просачивания магнитного поля сквозь заготовку.

Входящие в формулу (1) параметры практически независимы друг от друга, в связи с чем определение оптимальных условий выполнения технологических операций можно произвести, анализируя каждый из параметров. Формула (1) учитывает только электрические параметры процесса и не учитывает механику процесса деформирования и импульсный характер приложения нагрузки. Поэтому она может использоваться только для оптимизации электрических параметров процесса. При разработке и реализации эффективной технологии магнитно-импульсной обработки необходимо решать следующие основные задачи:

1. Передать с максимальной эффективностью энергию, запасённую в батареях конденсаторов, в систему “индуктор-заготовка”.
2. Эффективно преобразовать энергию, переданную в систему “индуктор-заготовка”, в давление магнитного поля на поверхности заготовки.
3. Превратить энергию давления магнитного поля в работу деформации и кинетическую энергию заготовки.

Решение каждой из перечисленных задач производится на разных уровнях протекания процесса, различными средствами при прочих разных условиях, слабо влияющих друг на друга.

Оптимизация процесса передачи энергии конденсаторов в систему “индуктор-заготовка” сводится к увеличению коэффициентов K_1 и K_2 .

Коэффициент для системы установка-индуктор-заготовка равен

$$K_1 = \frac{n^2 L_{u-3}}{n^2 L_{u-3} + L_y} \approx \frac{f_0^2 - f^2}{f_0^2}, \quad (2)$$

где n - число витков индуктора; L_{u-3} - индуктивность системы “индуктор-заготовка” в расчёте на один виток; L_y - собственная индуктивность установки; f_0 - собственная частота разряда установки; f - рабочая частота разряда.

Как видно из выражения (2), при заданной геометрии заготовки и, следовательно, заданной геометрии системы “индуктор-заготовка” ($L_{u-3} \approx const$) и частоте разряда коэффициент K_1 можно увеличить за счёт уменьшения индуктивности установки L_y , увеличения числа витков индуктора n , увеличения собственной частоты разряда установки f_0 . При этом частота разряда может быть задана, например, исходя из условия просачивания поля сквозь заготовку.

Возможности снижения тепловых потерь в индукторе также весьма ограничены из-за ограниченности номенклатуры высокопрочных материалов с высокой электропроводностью, которые могут использоваться в конструкциях индукторов.

Таким образом, изменять коэффициент K_2 можно, лишь варьируя частотой разрядного тока.

При анализе процесса преобразования магнитной энергии в давление магнитного поля на заготовку можно выделить следующие две основные причины снижения эффективности её преобразования.

1. Снижение эффективности индуцирования токов в заготовке и появление противодавления при просачивании магнитного поля сквозь заготовку.

2. Создание магнитного поля вне зазора между индуктором и заготовкой - между токоведущими поверхностями индуктора. Эффективность индуцирования токов в заготовке оценивается коэффициентом K_4 :

$$K_4 = \frac{Q_3^2}{Q_3^2 + \frac{L_u}{L_{u-3}}}, \quad (3)$$

где Q_3 - добротность заготовки; L_u - индуктивность холостого хода индуктора; L_{u-3} - индуктивность системы “индуктор-заготовка”.

Очень сильное влияние просачивания поля приводит к тому, что граница оптимальных режимов системы “индуктор-заготовка” по энергозатратам практически всегда соответствует условию, при котором

$$K_4 \geq 0.3...0.5; Q_3 \geq 0.7...1.0.$$

Интегральная оценка величины электродинамических усилий, действующих на заготовку, производится с помощью коэффициента K_3 , который можно определить следующим образом:

$$K_3 = \frac{\partial L_{u-3}}{\partial (\Delta_{экр})} \cdot \frac{\Delta_{экр}}{L_{u-3}}, \quad (4)$$

где $\Delta_{экр}$ - зазор и одновременно координата, в направлении которой действует давление.

Для многovitкового индуктора с постоянной поверхностной плотностью тока оптимальным является случай: $\Delta_{экр} \rightarrow 0$, когда поле в рабочем зазоре однородно, а эпюра давления представляет собой прямоугольник с давлением P_0 :

$$P_0 = \frac{W_{u-3}}{pDDl}, \quad (5)$$

где W_{u-3} - энергия, переданная в систему “индуктор-заготовка”; D_u - диаметр индуктора; l - ширина индуктора (токовой полосы).

При увеличении зазора поле в нём становится неоднородным вследствие краевых эффектов, часть энергии оказывается распределённой в пространстве вне рабочего зазо-

ра. С увеличением зазора при неизменной энергии системы $W_{и-з}$ уменьшение давления магнитного поля на заготовку происходит за счёт увеличения объёма рабочего зазора или из-за уменьшения коэффициента K_3 .

Основным средством повышения величины давления при заданной энергии является, в первую очередь, уменьшение рабочего объёма $pDl\Delta$, что достигается при заданной геометрии заготовки уменьшением зазора $\Delta_{экв}$. Возможности уменьшения $\Delta_{экв}$ ограничены как величиной, необходимой электрической прочности изоляции индуктора, так и технологическими требованиями - возможностью лёгкой установки и съёма детали и достаточной механической прочностью и износостойкостью главной изоляции индуктора. Поэтому остаётся возможным увеличение давления за счёт увеличения коэффициента K_3 .

Для системы “индуктор-заготовка” можно предложить аппроксимацию следующего вида:

$$\frac{1}{L_{и-з}} \cong \frac{1}{L_{одн}} + \frac{1}{L_{конц}} + \frac{1}{L_{бок}} + \frac{1}{L_{обр}}, \quad (6)$$

где $L_{одн}$ - индуктивность системы при однородном поле; $L_{конц}$ - концевая индуктивность; $L_{бок}$ - индуктивность боковых поверхностей спирали индуктора; $L_{обр}$ - индуктивность обратной по отношению к заготовке поверхности спирали индуктора.

Для увеличения доли полезной энергии необходимо всемерно увеличивать добавочные индуктивности ($L_{конц}$, $L_{бок}$, $L_{обр}$) и уменьшать тем самым добавочные токи.

Критерием высокой эффективности системы “индуктор-заготовка”, с точки зрения преобразования энергии поля в электродинамическое усилие, является выражение

$$\frac{1}{L_{одн}} \ll \frac{1}{L_{конц}} + \frac{1}{L_{бок}} + \frac{1}{L_{обр}}. \quad (7)$$

При магнитно-импульсной обработке особое значение представляет процесс превращения энергии давления магнитного поля

в работу деформации и кинетическую энергию заготовки.

При разряде конденсаторных батарей через индуктор на заготовку действует давление магнитного поля

$$P_m = P_{m0} e^{-dt} \sin^2 wt, \quad (8)$$

где P_m - амплитудное значение давления магнитного поля; d - декремент затухания; t - время процесса; w - круговая частота разрядного тока.

Эта формула справедлива при условии, что магнитное поле не проникает сквозь заготовку и “скин-слой” будет меньше толщины заготовки, то есть

$$D = \sqrt{\frac{2}{m g_0 w}} < S. \quad (9)$$

При расчётах эффективности процесса превращения энергии давления магнитного поля в работу деформации делаются следующие допущения:

1. Давление магнитного поля равномерно по длине обрабатываемой заготовки.
2. Отсутствует просачивание магнитного поля через заготовку.
3. Деформируемая заготовка тонкостенная, т.е. $D_0 \gg S$, где D_0 - исходный диаметр заготовки.

Уравнение движения в общем случае записывается в следующем виде:

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} = \Sigma F, \quad (10)$$

где u - перемещение заготовки; F - действующие силы.

При принятых допущениях уравнение движения трубной заготовки можно записать следующим образом, исходя из равенства внешних и внутренних сил:

$$\frac{1}{2} r S \frac{d^2 u}{dt^2} = P_m - P_s, \quad (11)$$

где P_m - текущее давление магнитного поля на заготовку; P_s - сопротивление деформированию; r - плотность материала заготовки.

Пластическая деформация при сложно-напряжённом состоянии возможна при выполнении условия Мизеса:

$$s_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2} = s_{0.2}, \quad (12)$$

где s_1, s_2, s_3 - главные нормальные напряжения; s_i - интенсивность нормальных напряжений.

Для осесимметричного напряжённого состояния, что имеет место при деформировании трубных заготовок:

$$s_1 = s_r \quad s_2 = s_q \quad s_3 = s_z,$$

где s_r, s_q, s_z - радиальные, тангенциальные и осевые напряжения.

При свободной раздаче, когда торцы заготовки не закреплены и нет осевых сил, $s_z = 0$.

Тогда равенство (12) примет следующий вид:

$$s_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(s_r - s_q)^2 + s_r^2 + s_q^2}$$

или $s_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{s_r^2 - 2s_r s_q + s_q^2 + s_r^2 + s_q^2}$

или $s_i = \sqrt{s_r^2 - s_r s_q + s_q^2}. \quad (13)$

При магнитно-импульсном деформировании тонкостенных заготовок ($S \ll D$) в случае резко выраженного скин-эффекта и давления магнитного поля, приложенного к поверхности заготовки, обращённой к индуктору, можно считать, что радиальные напряжения постоянны по толщине заготовки и равны давлению магнитного поля, т.е. $s_r = P_m$. Тангенциальные окружные напряжения можно определить по следующим зависимостям:

$$s_q = \frac{P_m D}{2S} \quad \text{или} \quad s_q = \frac{D s_r}{2S};$$

$$\frac{D}{2S} \gg 1 \quad \text{и} \quad s_q \gg s_r. \quad (14)$$

Для случая $\frac{D}{2S} \gg 1, s_q \gg s_r$ напряжённое состояние будет близко к линейному, т.е. можно принять $s_i \approx s_q$. В этом случае сопротивление пластическому деформированию определяется следующей зависимостью:

$$P_s = \frac{s_q S}{D/2} = \frac{s_r^q S}{D/2}. \quad (15)$$

Обозначим $\frac{P_{M_0}}{P_s} = K_{nep}$ - коэффициент

перегрузки, равный отношению амплитудного значения давления магнитного поля P_m к удельному сопротивлению деформирования P_r , численно равному давлению поля, при котором начинается пластическое деформирование заготовки в тангенциальном направлении при динамическом нагружении.

Тогда уравнение движения можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{2} r \frac{d^2 D}{dt^2} = P_s (K_{nep} e^{-d t} \sin^2 \omega t - 1). \quad (16)$$

Из (16) видно, что пластическое деформирование заготовки возможно только при K_{nep} , существенно больших единицы, т.к. $\sin^2 \omega t \leq 1, e^{-d t} < 1$.

При выводе основных зависимостей были приняты следующие допущения.

1. Разгон заготовки заканчивается после первой полуволны разрядного тока (первой полуволны давления поля), а остальные полуволны не оказывают давления на заготовку, что имеет место практически во всех операциях формовки.

2. Эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой на участке разгона мало изменяется и не влияет на величину давления поля.

3. Величина деформации заготовки на участке разгона происходит за счёт кинетической энергии.

4. Сопротивление воздуха мало и им можно пренебречь.

Исходя из условия равенства внешних и внутренних сил, определяется время начала и окончания разгона заготовки относительно начала протекания тока по индуктору и время действия давления поля.

Информация об авторах

Кирилин Александр Николаевич, генеральный директор, доктор технических наук, профессор, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Паламарчук Юрий Ефимович, начальник отдела, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Вершигоров Вячеслав Михайлович, заместитель генерального директора по общим вопросам, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».