

ВЛИЯНИЕ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

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

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

$$W_D = P_{i_0} S D_{экв} \frac{I}{\hat{E}_1 \hat{E}_2 \hat{E}_3 K_4}, \quad (1)$$

где P_{i_0} - амплитудное значение давления магнитного поля; S - площадь поверхности заготовки; $D_{экв}$ - 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 :

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

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:

$$K_3 = \frac{\partial L_{e-\zeta}}{\partial (\Delta_{y\dot{e}\dot{a}})} \cdot \frac{\Delta_{y\dot{e}\dot{a}}}{L_{e-\zeta}}, \quad (4)$$

где $\Delta_{y\dot{e}\dot{a}}$ - зазор и одновременно координата, в направлении которой действует давление.

Для многovitкового индуктора с постоянной поверхностной плотностью тока оптимальным является случай: $\Delta_{э\kappa\beta} \rightarrow 0$, 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 объема $pDl\Delta$, 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 счет увеличения коэффициента K_3 .

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

$$\frac{1}{L_{\dot{e}-\zeta}} \cong \frac{1}{L_{\dot{r}\dot{a}\dot{i}}} + \frac{1}{L_{\dot{e}\dot{i}\dot{o}}} + \frac{1}{L_{\dot{a}\dot{i}\dot{e}}} + \frac{1}{L_{\dot{i}\dot{a}\dot{o}}}, \quad (6)$$

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

$$\frac{1}{L_{\dot{r}\dot{a}\dot{i}}} \ll \frac{1}{L_{\dot{e}\dot{i}\dot{o}}} + \frac{1}{L_{\dot{a}\dot{i}\dot{e}}} + \frac{1}{L_{\dot{i}\dot{a}\dot{o}}}. \quad (7)$$

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

$$P_i = D_{i_0} e^{-dt} \sin^2 wt, \quad (8)$$

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:

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

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. $s_r = P_i$. Тангенциальные окружные напряжения можно определить по следующим зависимостям:

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

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

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:

$$P_s = \frac{s_q S}{D/2} = \frac{s_q^0 S}{D/2}. \quad (15)$$

Обозначим $\frac{P_{i_0}}{P_s} = K_{i\delta}$ - 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:

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

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.

THE EFFECT OF INDUCTOR SYSTEMS ON THE EFFICIENCY OF MAGNETIC PULSE FORMING

© 2008 Yu. Ye. Palamartchuk, A. N. Kirilin, V. M. Vershigorov

Central Design Bureau “Progress”

The paper presents the results of investigations related to the realization of efficient technology of magnetic pulse working. Higher process efficiency is due to the optimization of energy transfer in a discharge circuit and the transformation of pulse field pressure into deformation work and blank kinetic energy. The basic expressions that make it possible to determine the amount of losses of energy stored in the system’s capacitors as it is transformed into blank deformation work.

Pulse magnetic fields, forming, inductor systems, overload factors, part deformation

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».

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

Kirilin, Alexander Nikolayevitch, general director, doctor of Technical Science, professor, Central Design Bureau “Progress”.

Palamartchuk, Yuri Yefimovitch, head of department, Central Design Bureau “Progress”.

Vershigorov, Vyacheslav Mikhailovitch, Deputy General Director for General Matters, Central Design Bureau “Progress”.