

УДК 621.98.044

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ФОРМОВКИ

© 2012 В. Ф. Карпухин

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П.Королёва (национальный исследовательский университет)

Предлагается инженерная методика расчёта формовки широкого спектра осесимметричных и листовых деталей. При этом учитываются такие важные факторы процесса, как потери энергии на создание поля внутри индуктора в случае формовки по схеме раздачи заготовки и наличие витков индуктора, не прикрытых заготовкой. Экспериментальная проверка подтвердила достаточно высокую точность определения режимов формовки различных деталей.

Магнитно-импульсная технология, формовка, индуктор, расчёт режима.

Технологические процессы магнитно-импульсной обработки носят сложный электромеханический характер. Нагружение заготовки осуществляется электродинамическими силами, возникающими вследствие взаимодействия переменного магнитного поля, создаваемого индуктором при разряде энергии, накопленной в конденсаторной батарее магнитно-импульсной установки (МИУ), с током, наведённым этим полем в заготовке. Импульс тока протекает в приповерхностных слоях индуктора и заготовки, обращённых друг к другу, и вызывает их нагрев, что приводит к изменению их физических свойств и параметров разрядной цепи. Электродинамические силы имеют объёмное распределение по заготовке. Перемещение заготовки изменяет характеристики зазора между индуктором и заготовкой и, следовательно, изменяет параметры разрядной цепи и электродинамических сил. Таким образом, на результат процесса действует множество взаимно связанных факторов. Поэтому аналитические расчёты и численное моделирование процессов магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) обычно проводят на упрощённых моделях при допущениях, касающихся параметров разрядной цепи МИУ и магнитного поля в изоляционном зазоре, в материале индуктора и заготовки, а также физических и механических свойств материалов индуктора и заготовки.

Наиболее точные результаты даёт численное моделирование процессов, так как

оно использует наименьшее количество упрощающих допущений. Однако использование численного моделирования процессов МИОМ позволяет решать только прямую задачу, то есть определять результаты выполнения операции при заданных начальных параметрах процесса. Поэтому для того, чтобы найти оптимальный вариант технологического процесса, нужно провести расчёт нескольких вариантов процесса при различных значениях начальных параметров и обработать результаты расчётов. Кроме того, оно требует достаточно большого времени. Объём расчётов может быть значительно сокращён, если предварительно оценить границы области поиска оптимальных начальных параметров процесса с помощью упрощённых инженерных методик.

В данной работе изложена инженерная методика расчёта процессов магнитно-импульсной формовки трубчатых и листовых деталей.

Отличительной особенностью процессов формовки является то, что перемещения заготовки достаточно большие. Процесс деформирования обычно занимает время, превышающее продолжительность первого полупериода колебаний разрядного тока. Поэтому расчёт параметров давления магнитного поля основан на предположении о том, что деформируемая часть заготовки разгоняется за время, равное $0,375$ периода колебания разрядного тока T , а дальнейшее деформирование заготовки происходит за счёт кинетической энергии, накопленной на участке разгона. Такое допущение сделано в

связи с тем, что согласно [1] к этому моменту времени заготовка при магнитно-импульсной обработке получает максимальную скорость. Это обусловлено двумя факторами: во-первых, к этому моменту времени величина тока в индукторе существенно снижается по сравнению с его амплитудным значением, а, во-вторых, зазор между индуктором и деформируемой частью заготовки достигает величин, при которых эффективность воздействия на заготовку магнитного поля, создаваемого индуктором, весьма мала.

Одна из важнейших величин, характеризующих процесс формоизменения при магнитно-импульсной обработке, – работа деформации. Удельная работа деформации заготовки при степенной аппроксимации кривой упрочнения определяется следующим выражением [2]:

$$a_s = \frac{B_d}{1+m_m} \varepsilon^{1+m_m}, \quad (1)$$

где a_s – удельная работа деформации; ε – величина деформации; B_d , m_m – механические характеристики штампуемого материала.

Динамическое значение коэффициента степенной аппроксимации кривой упрочнения

$$B_d = B \cdot k_d, \quad (2)$$

где B – статическое значение коэффициента, величина которого может быть взята из работы [3]; k_d – коэффициент динамичности, рассчитываемый по формуле:

$$k_d = 3 \cdot \exp(-0,36 \cdot 10^7 \cdot \sigma_{ys}), \quad (3)$$

Полная работа деформации заготовки:

$$A = \int_Q a_s dQ, \quad (4)$$

где Q – объём деформируемой части заготовки.

В практике при расчёте удельной работы деформации по формуле (1) часто пользуются средним значением величины деформации ε_c , которое определяют путём усреднения эпюры распределения интенсивности деформаций по зоне деформирования.

Согласно сказанному выше, полная работа деформации должна равняться кинетической энергии, полученной деформируемой частью заготовки на этапе

разгона. Кинетическая энергия заготовки W_k для гидродинамической модели материала заготовки определяется выражением:

$$W_k = \frac{m \cdot V_c^2}{2} = \frac{\rho \cdot Q \cdot V_c^2}{2}, \quad (5)$$

где m и V_c – масса и средняя скорость деформируемой части заготовки; ρ – плотность материала заготовки.

Из выражений (4) и (5) формула для расчёта необходимой средней скорости заготовки в конце участка разгона получит вид [4]:

$$V_c = \sqrt{\frac{2a_c}{\rho}}. \quad (6)$$

Поскольку активный участок движения обрабатываемой заготовки заканчивается в течение первого полупериода разрядного тока, то при анализе разгона заготовки может быть использован синусоидальный закон изменения тока в разрядном контуре МИУ. Для синусоидального закона изменения разрядного тока выражение для определения амплитуды давления импульсного магнитного поля (ИМП), обеспечивающей разгон заготовки до скорости V_c к моменту времени $\omega t = 0,75\pi$, имеет вид [4]:

$$P_m = 4,4 \cdot V_c \cdot f_w \cdot \rho \cdot s. \quad (7)$$

Величина перемещений заготовки в конце этапа разгона h_a составляет:

$$h_a = 0,141 \frac{V_c}{f_w}. \quad (8)$$

Подстановка значения скорости из выражения (6) в формулу (7) позволяет определить необходимые для формовки детали параметры давления ИМП, которые в дальнейшем используются для расчёта энергии разряда МИУ. Значение рабочей частоты разрядного тока определяется при расчёте параметров индуктора.

Данная модель может использоваться, если величина начального зазора между заготовкой и матрицей или оправкой превышает значение h_a по выражению (8).

Усреднённая величина деформации, которая используется при расчёте удельной работы деформации по выражению (1), зависит от характера выполняемой операции.

Наиболее характерными элементами трубчатых деталей являются цилиндр, конус, сфера и рифт. На рис. 1 представлены характерные элементы формоизменения трубчатых заготовок и соответствующие

эпюры распределения деформации (пунктиром на эпюрах нанесена средняя величина деформации).

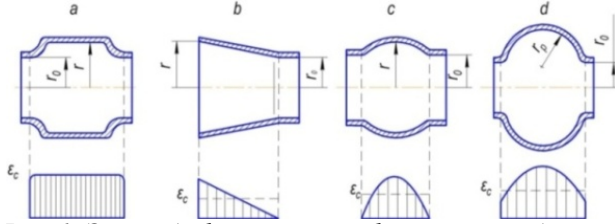


Рис. 1. Эпюры деформации при формовке трубчатых деталей

Схема *a* на рис. 1 соответствует случаю формообразования цилиндра, для которого средняя величина деформации:

$$\epsilon_c = \frac{r}{r_0} \tag{9}$$

На схемах *b, c, d* соответственно показано формообразование конуса, сферы и рифта, для которых средняя величина деформации составляет [2]:

$$\epsilon_c = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_0} - 1 \right) \quad (\text{конус}); \tag{10}$$

$$\epsilon_c = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{r}{r_0} - 1 \right) \quad (\text{сфера}); \tag{11}$$

$$\epsilon_c = \frac{\pi \cdot r_p}{4r_0} \quad (\text{рифт}). \tag{12}$$

Приведённые формулы позволяют по выражениям (1), (6) и (7) рассчитать необходимое для формовки деталей давление ИМП.

Наиболее распространёнными при изготовлении деталей листовой формовкой являются операции отбортовки внешнего и внутреннего контура, гибки борта и вытяжки пуклевок и рифтов.

Процесс отбортовки круглых отверстий считается по формулам для формовки конуса на трубчатых заготовках. В формуле (10) для этого случая r_0 - диаметр отверстия в заготовке; r - внутренний диаметр горловины.

При расчёте процессов отбортовки отверстий некруглой формы расчёт необходимой величины давления ИМП следует вести для участка, имеющего наименьший радиус.

Расчёт удельной работы деформации процесса имеет свои отличительные особенности. Величина момента внутренних сил M при гибке прямолинейного борта может быть подсчитана по формуле [5]:

$$M = 0.25(\sigma_{yd} \cdot l_b \cdot s^2), \tag{13}$$

где l_b - длина борта вдоль линиигиба; σ_{yd} - динамический предел текучести материала заготовки, равный

$$\sigma_{yd} = \sigma_{yd} \cdot k_d. \tag{14}$$

Работа деформации, обеспечивающая процесс гибки борта, определяется выражением:

$$A = M \cdot \varphi, \tag{15}$$

где φ - уголгиба борта.

Формула для средней удельной работы деформирования борта, полученная совместным решением выражений (13) и (15), имеет следующий вид:

$$a_s = \frac{A}{l_b \cdot h_b \cdot s} = \frac{\sigma_{yd} \cdot s \cdot \varphi}{4h_b}, \tag{16}$$

где h_b - высота борта.

При гибке борта на угол $\varphi = \pi/2$ формула для расчёта средней удельной работы деформации получит вид:

$$a_s = \frac{\pi \cdot \sigma_{yd} \cdot s}{8h_b}. \tag{17}$$

Для расчёта энергии, необходимой для выполнения операции, достаточно широко используется формула, предложенная сотрудниками Чувашского государственного университета [6]:

$$W = \frac{P_m \cdot \Omega \cdot \delta_e}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}, \tag{18}$$

где P_m - амплитудное значение давления импульсного магнитного поля; Ω - площадь обрабатываемой зоны; δ_e - эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой.

Коэффициенты, входящие в выражение (18), характеризуют паразитные потери энергии в системе «установка - индуктор - заготовка». Коэффициент K_1 учитывает индуктивные потери в МИУ, K_2 - активные потери в индукторе и заготовке, K_3 - краевые эффекты, то есть неоднородность поля в объёме $\Omega \delta_e$, K_4 - просачивание магнитного поля сквозь материал заготовки.

Формула (18) даёт хороший результат при анализе процессов калибровки и сборки, в средней зоне заготовки, выполняемых по схеме обжима. В других случаях она даёт заниженную величину необходимой энергии.

В процессах МИОМ для

регулирования распределения давления магнитного поля по длине заготовки часто используют схемы, в которых длина индуктора больше длины обрабатываемой зоны заготовки. При этом часть витков индуктора оказываются не прикрытыми заготовкой (рис. 2 а) [7]. Вследствие этого на создание поля за пределами заготовки расходуется дополнительная энергия.

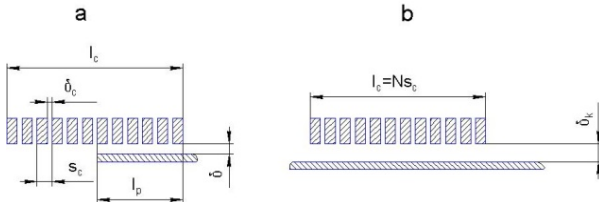


Рис. 2. Схема для расчёта приведённой величины зазора между индуктором и заготовкой

Для учёта влияния свободных витков индуктора можно использовать следующий приём. Схема взаимного расположения индуктора и заготовки, представленная на рис. 2 а, заменяется схемой, изображённой на рис. 2 б, то есть принимается, что заготовка полностью перекрывает индуктор. Но величина изоляционного зазора между индуктором и заготовкой δ увеличивается до значения δ_k , которое вычисляется по выражению:

$$\delta_k = \frac{\delta_e \cdot N_w + \sum_1^{N_f} \sqrt{(s_c \cdot (N_f - 1))^2 + \delta^2}}{N}, \quad (19)$$

где N_w и N_f – количество рабочих и свободных витков индуктора, соответственно; $N = N_w + N_f$ – общее количество витков индуктора; s_c – шаг витков индуктора.

Анализ схемы замещения индуктора, работающего по схеме раздачи заготовки, позволил получить формулу для коэффициента k_e , учитывающего потери энергии на создание поля во внутренней полости индуктора, в следующем виде:

$$k_e = \left(2 \frac{R_c}{R_i} \cdot \frac{\delta_e}{R_i} + 1 \right)^2. \quad (20)$$

Кроме того, следует учитывать также и изменение зазора между индуктором и заготовкой, обусловленного деформацией заготовки. С достаточной для инженерных расчётов точностью это может быть учтено, если добавить в выражении (18) к значению эквивалентного зазора половину

перемещения заготовки на участке разгона, определяемого формулой (8).

С учётом вышеизложенного выражение для расчёта необходимой энергии разряда магнитно-импульсной установки получит следующий вид:

$$W = \frac{P_m \cdot \Omega \cdot (\delta_k + 0,5h_a) \cdot k_e}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}. \quad (21)$$

Данная методика использовалась при разработке технологических процессов формовки конусов и рифтов на трубчатых заготовках и отбортовки отверстий на листовых заготовках. Сопоставление результатов расчётов по приведённой методике и экспериментальной отработки режимов формовки показало, что они отличаются не более, чем на 5...7 %.

Библиографический список

1. Горкин, Л. Д. Экспериментальные исследования процесса магнитно-импульсной обработки металлов [Текст] / Л. Д. Горкин, Л.Т. Хименко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. - №7. – С. 4-6.
2. Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов [Текст] / И. В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: “Вища школа”, 1977. – 168 с.
3. Сапаровский, С.В. Новые способы холодной штамповки [Текст] / С.В. Сапаровский, Е.П. Смеляков, А.Д. Комаров. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1969. – 182 с.
4. Карпухин, В.Ф. Инженерная методика расчета процессов магнитно-импульсной обработки [Текст] / В.Ф. Карпухин // Материалы Второй Международной научно-технической конференции «Металлдеформ 2004», Секция 3.- Самара, 2004.- С. 13.
5. Горбунов, М. Н. Технология заготовительно - штамповочных работ в производстве самолетов [Текст] / М.Н. Горбунов. - М.: Машиностроение, 1981. - 224 с.
6. Лебедев, Г.М. Расчет параметров магнитного молота [Текст] / Г. М. Лебедев, Ю. М. Овчинников, Ю. А. Попов // Вопросы производства летательных аппаратов: Труды Куйбышевского авиационного института. – Куйбышев, 1970. – Вып. 41. – С.18-22.

7. Высокоэффективные технологические процессы изготовления трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов [Текст] / В.А. Барвинок [и др.]. – М.: Наука и технологии, 2002. – 394 с.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF PULSE-MAGNETIC FORMING

© 2012 V. F. Karpuhin

Samara State Aerospace University
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

The paper proposes the engineer method for calculation of forming of a wide spectrum of axially symmetric and sheet articles. Therewith such important factors of the process are taken into account as the energy losses by inducing a field within the inductor in the case of forming on a workpiece expansion scheme and presence of inductor's turns not covered by the workpiece. The experimental verification has supported rather high accuracy of determination of regimes of forming of different articles.

Pulse magnetic technology, forming, inductor, mode calculation.

Сведения об авторе

Карпухин Владимир Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: nil41vf@mail.ru. Область научных интересов: магнитно-импульсная обработка материалов.

Karpukhin Vladimir, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Officer, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: nil41vf@mail.ru. Area of research: pulse-magnetic processing of materials.