

УДК 621.7.044

В.В. ТРЕТЬЯК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ В ОБЪЕКТНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

В статье представлены схема и особенности использования магнитно-импульсной штамповки для разработки технологических процессов листовых деталей. Представлена принципиальная схема для исследований электромеханического превращения электрической энергии в работу пластического деформирования заготовки. Представлены уравнения движения заготовки, описывающие электромагнитные явления. Представлены уравнения движения заготовки. Описываются краевые условия решения задачи моделирования процесса. Описаны особенности взаимодействия импульсных токов и электромагнитных полей. Представлена схема для проведения экспериментальных исследований. Представлена разработанная программа для расчета параметров технологического процесса магнитно-импульсной штамповки, выполненная в объектном представлении. Описаны особенности и преимущества использования объектного подхода для разработки программного обеспечения.

Ключевые слова: магнитно-импульсная штамповка, импульсные методы, технологический процесс, параметры технологического процесса, объектный подход, моделирование технологического процесса.

Введение

Магнитно-импульсная штамповка относится к электрическим способам импульсной листовой штамповки. Сущность ее заключается в том, что механическая работа пластического деформирования материала заготовки совершается электромагнитными силами, действующими на металличе-

скую заготовку, в которой протекает импульсный ток, индуцируемый током индуктора при его взаимодействии с импульсным электромагнитным полем этого индуктора.

Принципиальная схема электромеханического превращения электрической энергии в работу пластического деформирования заготовки показана на рис. 1.

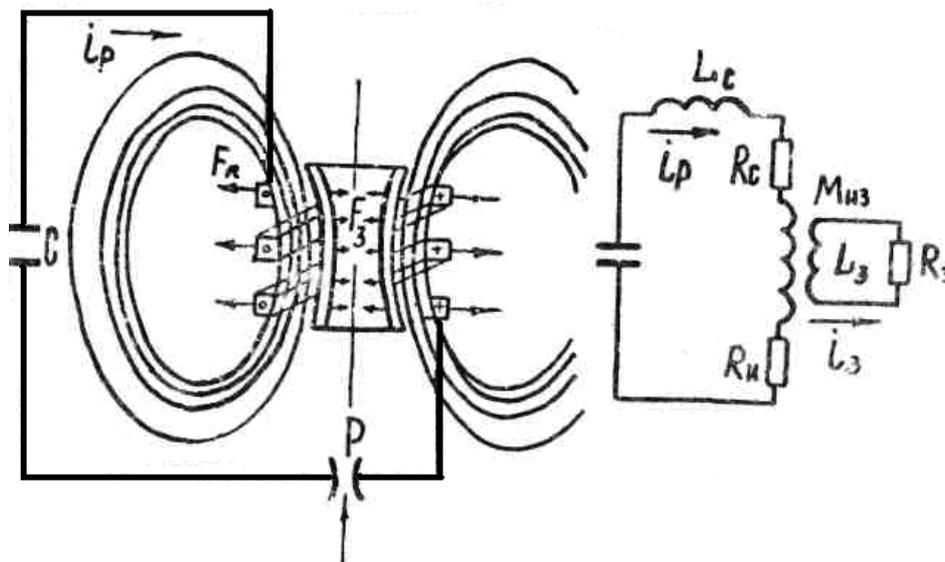


Рис. 1. Принципиальная схема процесса МИШ.

1 - заготовка, 2 - индуктор; i_p - разрядный ток; C - накопительная конденсаторная батарея; P - разрядник; F - механические силы электромагнитного взаимодействия; L_c - индуктивность разрядного контура; R_c - сопротивление (активное) разрядного контура; L_n - индуктивность индуктора; R_n - активное сопротивление индуктора; i_3 - индуцированный ток в заготовке; L_3 , R_3 - индуктивность и активное сопротивление заготовки; $M_{из}$ - коэффициент взаимной индукции индуктора и заготовки

1. Расчет параметров для технологии магнитно-импульсной штамповки

Процесс магнитно-импульсной штамповки описывается совокупностью дифференциальных уравнений, характеризующих электромагнитные, тепловые и механические явления.

Уравнения, описывающие электромагнитные явления:

$$\operatorname{rot} \bar{E} = \mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \mu [\bar{V}, \bar{H}], \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{\sigma}, \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \gamma \bar{E}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \bar{E} = 0, \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \bar{H} = 0, \quad (5)$$

где \bar{E} – напряженность электрического поля; μ – магнитная проницаемость металла; \bar{H} – напряженность магнитного поля; γ – электропроводность металла; $\bar{\sigma}$ – плотность тока; \bar{V} – скорость перемещения проводника.

Если учесть, что $\gamma = \gamma(\theta)$, т.е. γ зависит от температуры, то уравнение (3) приобретает вид

$$\bar{\sigma} = \frac{\gamma_0}{1 + \beta_T C_n \theta} \bar{E}, \quad (6)$$

где γ_0 – электропроводность при нулевой температуре; β_T – тепловой коэффициент; C_n – удельная теплоемкость материала; θ – температура проводника.

Механические эффекты описываются следующим образом.

На единицу объема проводника, находящегося в магнитном поле с напряженностью H , действует сила

$$\bar{F} = \mu [\bar{\sigma} \cdot \bar{H}]. \quad (7)$$

С учетом формулы (2) уравнение (7) принимает вид

$$\bar{F} = \left[\bar{H} \left(\Delta \bar{H} - \frac{1}{2} \nabla H^2 \right) \right] \mu. \quad (8)$$

Необходимо также принимать во внимание зависимости, характеризующие пластическое деформирование заготовки.

В общем случае такая зависимость имеет вид уравнения движения заготовки:

$$D_1(\bar{V}) + P_m \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} - \bar{F}_c = 0, \quad (9)$$

здесь \bar{V} – вектор скорости перемещения заготовки; \bar{F}_c – суммарная сила, действующая на элементы заготовки; P_m – массовая плотность металла; $D_1(\bar{V})$ – оператор, описывающие пластическую деформацию, вид которого определяется формой заготовки и схемой нагружения.

Следовательно, при решении уравнений (6) и (9) необходимо учитывать краевые условия.

Разрядный ток конденсатора (накопительной батареи) в цепи носит колебательный характер с большим декрементом затухания.

Решая уравнения, описывающие электромагнитные процессы в двухконтурной схеме при колебательном разряде, находим составляющую (первичного контура) разрядного тока

$$I_c = \frac{U_0}{W L_3} e^{-\delta t} \sin \omega t, \quad (10)$$

и составляющую тока в заготовке

$$I_3 = - \frac{U_0}{W L_3} \cdot \frac{M_{из}}{L_3} \cdot e^{-\delta t} \sin \omega t. \quad (11)$$

В этих выражениях U_0 – начальное разрядное напряжение, W – круговая частота двухконтурной схемы, δ – декремент затухания.

При принятых допущениях

$$\delta = \frac{R_3}{2L_3}. \quad (12)$$

Здесь R_3 – эквивалентное сопротивление двухконтурной схемы ($R_3 = R_c + R_n + R_3(1 - \psi)$); L_3 – эквивалентная индуктивность системы "индуктор - заготовка" ($L_3 - \psi L_1$), где ψ – коэффициент рассеяния.

Важными особенностями взаимодействия импульсных токов и электромагнитных полей является неодинаковость распространения импульсных полей в воздушной среде и в металлах, а также взаимосвязанный с этим явлением скин-эффект.

Проникновение магнитного потока в металл носит волновой характер, и в зависимости от частоты разрядного тока и параметров заготовки магнитное поле может сосредотачиваться между индуктором и заготовкой либо его максимум находится за заготовкой. От этого зависит направление индуцированных токов, а следовательно, и механических сил, развивающихся в заготовке.

Варьируя электрические параметры разряда, можно изменять направление деформирования заготовки.

Обычно в условиях магнитно-импульсной штамповки частота разрядного тока имеет величину несколько десятков килогерц.

При таких частотах магнитное поле вне металла можно считать квази-стационарным, сосредоточенным между заготовкой и индуктором.

Распространение поля в металле имеет волновой характер, и за один период оно не может проникнуть на всю глубину заготовки.

Глубину проникновения поля оцениваем величиной Δ – толщиной слоя, в котором индуцированный ток имел бы равномерно распределенную плотность

$$i_3 = \sigma_m / \sqrt{2}. \quad (13)$$

Таким образом, в этом случае резко проявляется скин-эффект. Поскольку при реализуемых частотах $\Delta \sim 10^{-2}$ мм, то это явление позволяет с высокой эффективностью использовать при штамповке материалов с очень высоким удельным сопротивлением (и даже диэлектриков) "спутники" – медную или алюминиевую фольгу, помещаемую на поверхности заготовки, в которой и индуцируются наведенные токи.

Выделим в заготовке, расположенной вблизи индуктора (на расстоянии h_b от него), элементарный объем dV_M и обозначим его в системе координат, начало которой находится на поверхности заготовки толщиной S , а оси направлены по нормали к поверхности (ось Z) и по положительным направлениям векторов \vec{E} (ось x) и \vec{H} (ось y). Считаем, что толщина элементарного объема – dZ , а площадь – $dx dy = I$.

Тогда в соответствии с уравнением (7) на проводник с током объемом $d\bar{V}_M$ действует сила

$$dF = \sigma B dV_M. \tag{14}$$

Поскольку $\sigma = \gamma E$, а $B = \mu_0 H$, то

$$dF = \mu_0 \gamma E H dZ.$$

Объемная плотность силы $f = \mu \gamma E H.$ (15)

Имея в виду, что напряженность H при высокой частоте тока обратно пропорциональна индуктивному сопротивлению, а индуктивность системы "индуктор - заготовка", например, для цилиндрического индуктора

$$L_{цм} = \frac{\pi \mu_0 (d - h_b) W_n^2}{\ell} \left(h_b + \frac{\Delta_n + \Delta_s}{2} \right), \tag{16}$$

а для дискового индуктора

$$L_{дм} = \frac{\pi \mu_0 W_n^2 (D + d)}{(D - d)}, \tag{17}$$

убеждаемся, что $f_M = f_M(\rho, h_b)$, т.е. f_M существенно зависит от удельного сопротивления материала заготовки и от зазора между заготовкой и индуктором.

В выражениях (16) и (17) d – внутренний диаметр обмотки индуктора, D – наружный диаметр обмотки индуктора, ℓ – длина обмотки, W_n – число витков индуктора, Δ_n – глубина проникновения магнитного поля в индукторе, Δ_s – соответственно в заготовке.

КПД при магнитно-импульсной штамповке зависит от многочисленных параметров (C, U, f и т.д.) и в первом приближении может быть представлен отношением суммы максимальной кинетической энергии W_K , запасенной движущейся заготовкой, и совершенной работы деформации W_d к полной энергии емкостного накопителя W_n :

$$\eta_M = \frac{W_K + W_d}{W_n}, \tag{18}$$

а в более развернутом виде

$$\eta_M = \frac{mV}{CU^2} + \frac{2K_3 B^{1+\alpha}}{(1+\alpha)CU^2}. \tag{19}$$

Здесь C – емкость накопительной батареи конденсаторов, U – напряжение зарядки конденсаторов, V_m – максимальная скорость движения заготовки, K_3 – объем заготовки, B, α – константы степенной зависимости упрочнения материала при пластическом деформировании.

Подставляя в уравнение (19) соответствующие величины, для случая метания диска многовитковым плоским индуктором находим

$$\eta_{ин} = \frac{m W_n^2 h_b^2}{CU^2} \left(\beta_n^2 e^{-\alpha \pi} \pi \right), \tag{20}$$

$$\beta_n = \frac{\mu_0 H_M^2}{4\alpha_3 h_3 W^2 \rho_M}. \tag{21}$$

Здесь $\alpha = \frac{\delta}{W}$, W – круговая частота разрядного тока, α_3 – коэффициент затухания тока в заготовке.

Следует отметить, что при метании плоской заготовки или диска максимальный КПД имеет место, когда

$$m W_n^2 h_b^2 \left(\beta_n^2 \pi \right)^2 = CU^2, \tag{22}$$

$$\left(\eta_{мп} \right)_{max} = e^{-2\alpha \pi}, \tag{23}$$

т.е. КПД определяется только активными потерями в контуре.

Механическую работу можно определить по высоте подброса плоской заготовки-диска l плоским многовитковым индуктором.

$$W = m q h \quad [\text{Дж}], \tag{24}$$

где m – масса заготовки, [кг]; q – ускорение свободного падения, [м/с²]; h – высота подброса, [м].

Величину электромеханического КПД плоского индуктора $\eta_{ин}$, при подбросе дисков-образцов оценить по зависимости

$$\eta_{мин} = \frac{4 W_K^2}{2 CU^2}. \tag{25}$$

2. Программная реализация расчетов

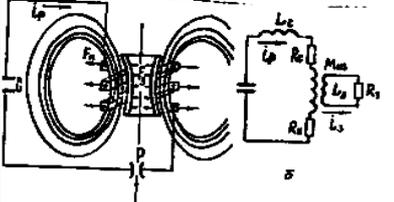
Разработана программа для расчета параметров магнитно-импульсной обработки выполненная в объектном исполнении. Известно, что объектно-ориентированные методы имеют следующие преимущества: существенно повышается качество разработки программы и ее фрагментов, программы получаются более компактными и дешевыми, обес-

печивается большее удобство в планировании в планировании разработки, упрощается процесс внесения изменений, изменение исходных требований не приводит к полной переработке программы, умень-

шается риск в разработке сложных программ, метод ориентирован на человеческое восприятие, так как для человека более приемлем объектный, а не процедурный подход [2].

Магнито-импульсная штамповка

Принципиальная схема процесса МИШ



Уравнения, описывающие электромагнитные явления

$$\text{rot } \vec{E} = \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu [\vec{v}, \vec{H}]$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{\sigma}, \quad \text{div } \vec{E} = 0,$$

$$\vec{\sigma} = \gamma \vec{E}, \quad \text{div } \vec{H} = 0,$$

$$\vec{\sigma} = \frac{\gamma_0}{1 + \beta_1 C_n \theta} \vec{E},$$

Уравнения, описывающие механические явления

$$\vec{F} = \mu [\vec{\sigma}, \vec{H}]$$

$$\vec{F} = \left[\vec{H} \left(\Delta \vec{H} - \frac{1}{2} \nabla H^2 \right) \right] \mu$$

$$\text{D}_1(\vec{v}) + P_n \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - \vec{F}_0 = 0,$$

Для цилиндрического индуктора

$$L_{\text{цм}} = \frac{\pi \mu_0 (d - h_e) W_n^2}{\ell} \left(h_e + \frac{\Delta_n + \Delta_s}{2} \right),$$

Для дискового индуктора

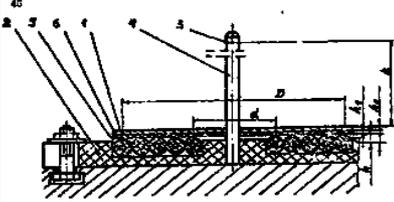
$$L_{\text{дм}} = \frac{\pi \mu_0 W_n^2 (D + d)}{(D - d)},$$

КПД

$$\eta_m = \frac{W_k + W_d}{W_n}, \quad \eta_{\mu} = \frac{mV}{CU^2} + \frac{2K_1 B^{1+\alpha}}{(1+\alpha)CU^2}, \quad \eta_{\text{ин}} = \frac{mW_n^2 h_e^2}{CU^2} (\beta_1^2 e^{-\alpha \pi})$$

$$\beta_1 = \frac{\mu_0 H_n^2}{4\alpha_1 h_e^2 W_n^2 \rho_n}, \quad mW_n^2 h_e^2 (\beta_1^2 \pi)^2 = CU^2, \quad (\eta_{\text{ин}})_{\text{max}} = e^{-2\alpha \pi}$$

Схема эксперимента



Построение графиков

0.1000	1.0000	10
0.1000	0.490000	
0.2000	0.980000	
0.3000	1.470000	
0.4000	1.960000	
0.5000	2.450000	
0.6000	2.940000	
0.7000	3.430000	
0.8000	3.920000	
0.9000	4.410000	
1.0000	4.900000	

Число точек: 10
 Минимальное значение: 0,1
 Максимальное значение: 1

Входные параметры:
 Масса заготовки - m, кг: 0,1
 Высота подброса - h, м: 0,5
 Зарядная емкость - C, Ф: 0,0001
 Зарядное напряжение - U, В: 20000

Выходные параметры:
 Работа, затраченная на подброс заготовки - W, Дж: 0,49
 КПД плоского индуктора - n: 0,2401

Расчет | Очистить

Рис. 2. Экранная форма для расчета параметров магнито-импульсной штамповки

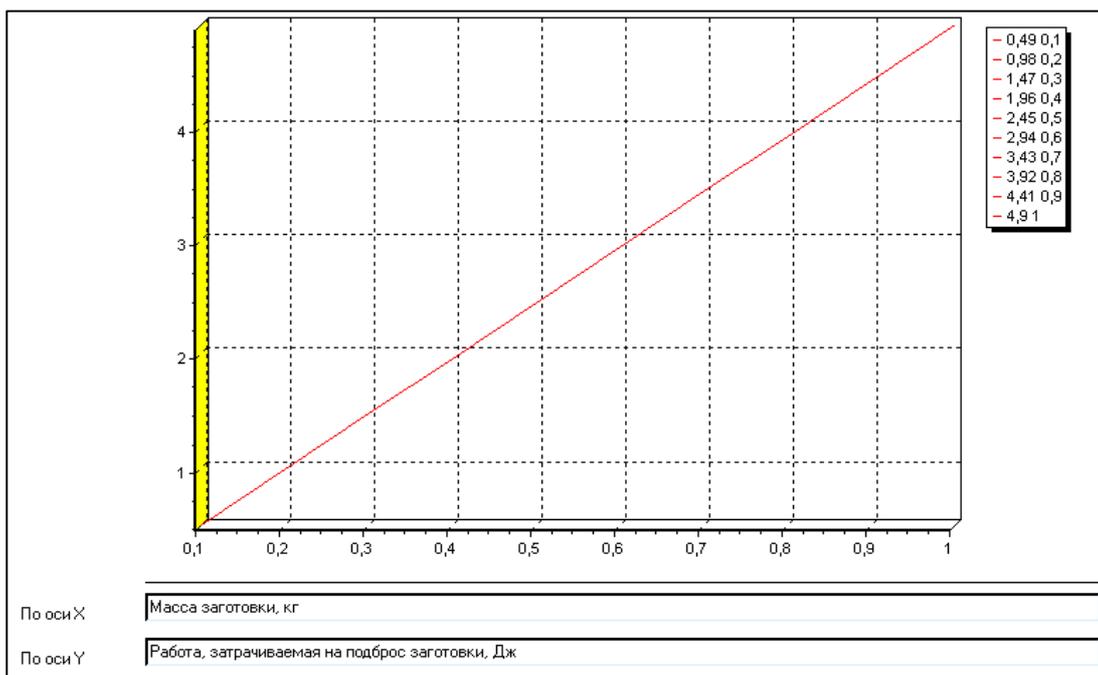


Рис. 3. Расчет зависимости работы деформирования от массы заготовки для параметров эксперимента

Выделяют три существенных момента объектно-ориентированного подхода (ООП): ООП используют в качестве элементов не объекты, а не алгоритмы. Каждый объект является реализацией какого либо класса, классы организованы иерархически. Концептуальной основой ООП являются следующие основные принципы: абстрагирование, иерархичность, ограничение доступа и модульность.

На рис. 2 и 3 изображены экранная форма программы расчета параметров магнитно-импульсной штамповки и график зависимости работы на подброс заготовки для параметров эксперимента. Программа может быть использована как для научных расчетов, так и в учебном процессе.

Литература

1. *Высокоэнергетические методы листовой штамповки [Текст] / В.К. Борисевич, А.И. Волков, Н.И. Семишов, В.В. Третьяк, Ю.И. Чебанов: учеб. пособие по лаб.практикуму. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «Харк. авиац. ин-т», 1998. – 75 с.*

2. *Евгенов, Г.Б. Систематология инженерных знаний: учеб. пособие для вузов [Текст] / Г.Б. Евгенов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 346 с.*

Поступила в редакцию 16.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии производства авиационных двигателей В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО ШТАМПУВАННЯ В ОБ'ЄКТНОМУ УЯВЛЕННІ

В.В. Третьяк

В статті представлена схема і особливості використання магнітно-імпульсного штампування для розробки технологічних процесів листових деталей. Представлена принципова схема для досліджень електромеханічного перетворення електричної енергії в роботу пластичної деформації заготовки. Представлені рівняння, що описують електромагнітні явища. Представлені рівняння руху заготовки. Описані крайні умови рішення задачі моделювання процесу. Описані особливості взаємодії імпульсних струмів і електромагнітних полів. Представлена схема для проведення експериментальних досліджень. Представлена розроблена програма для розрахунку параметрів технологічного процесу магнітно-імпульсного штампування, виконана в об'єктному уявленні. Описані особливості і переваги використання об'єктного підходу для розробки програмного забезпечення.

Ключові слова: магнітно-імпульсне штампування, імпульсні методи, технологічний процес, параметри технологічного процесу, об'єктний підхід, моделювання технологічного процесу.

COMPUTATION OF PARAMETERS OF MAGNETIC-IMPULSIVE STAMPING IN OBJECTIVE PRESENTATION

V.V. Tretiyak

In article a chart are presented and features of the use of the magnetic-impulsive stamping for development of technological processes of sheet details. In of principle chart is presented for researches of electromechanical transformation of electric energy in work of plastic deformation of purveyance. The equalizations are presented, describing the electromagnetic phenomena. The equalizations are presented of motion of purveyance. Regional terms are described of decision of task of design of process. Features are described of co-operation of impulsive currents and electromagnetic fields. A chart is presented for conducting of experimental researches. The developed program is presented for computation of parameters of technological process of the magnetic-impulsive stamping, executed in the objective presentation. Features are described and advantages of the use of objective approach for development of the program providing.

Keywords: magnetic-impulsive stamping, impulsive methods, technological process, parameters of technological process, objective approach, design of technological process.

Третьяк Владимир Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: mint_khai@rambler.ru.