

УДК 621.318

## ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ «ОБЖИМЕ» ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК В МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

**Волонцевич Д. О.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедры информационных технологий и систем колесных и гусеничных машин им. О. О. Морозова Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», e-mail: vdo\_khpi@ukr.net;

**Барбашова М. В.**, к.т.н., доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, e-mail: barbashova1987@gmail.com;

**Еремина Е. Ф.**, к.т.н., доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, e-mail: elena.yeryomina@gmail.com

*В статье проведен анализ электродинамических процессов при обжиге трубчатых заготовок, в условиях значительных диффузионных эффектов, индукторной системой для традиционной магнитно-импульсной обработки металлов. Исследованы электромагнитные процессы с помощью математического аппарата теории электромагнитного поля, решение поставленных краевых задач проведено аналитическими методами математической физики с последующей компьютерной обработкой полученных результатов. Результаты вычислений позволяют производить количественные оценки параметров диффузионных процессов при обжиге тонких металлических труб и прогнозировать наиболее возможную эффективность соответствующей производственной операции. Показано, что диффузионные процессы при обжиге трубчатых заготовок по форме матриц из материалов различной физической природы протекают совершенно идентично. Наличие диэлектрической матрицы, практически, соответствует увеличению зазора в случае матрицы из металла с высокой электропроводностью. Даны рекомендации по практическому осуществлению технологической операции обжим при формовке тонкостенных трубчатых заготовок величинами относительного снижения давления при различных значениях геометрических параметров исследованной системы.*

**Ключевые слова:** раздача труб, обжим, скин-эффект, магнитно-импульсная обработка.

**Постановка проблемы.** Производственные операции, выполняемые в традиционной магнитно-импульсной обработке металлов, условно разделяются на три основные группы [1–3]. Это, так называемые, плоская штамповка, «раздача» и «обжим» массивных хорошо проводящих металлических заготовок.

Современное производство требует расширения перечня технологических процессов, в основе которых лежит силовое воздействие на плохо проводящие или просто тонкостенные металлы [4].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Авторами [5] для плоской штамповки «прозрачных» листовых металлов теоретически и экспериментально обоснованы направления, сущность которых состоит в создании определённого пространственно-временного распределения напряжённости магнитного поля в поперечном сечении обрабатываемой заготовки. Практическим выходом проведенных исследований явилось создание прогрессивной технологии по изготовлению печатных плат в электротехнике [6].

Практические проблемы «раздачи» и «обжима» заготовок из тонкостенных (с точки зрения электродинамики) металлов требуют отдельного рассмотрения. Именно эти операции являются основными при сочленении отдельных элементов в сборных конструкциях (например, это могут быть рамы автомобильных кузовов) из сталей различных марок или из тонких алюминиевых сплавов и др.

Особенностям магнитно-импульсной «раздачи» тонкостенных трубчатых заготовок посвящена статья [7], где, в конечном итоге, сформулированы рекомендации по практическому осуществлению данной технологической операции при формовке тонкостенных трубчатых заготовок.

**Постановка задания.** Так же как и ранее в случае задачи, продолжим анализ электродинамических процессов в ситуации, когда диффузионные эффекты становятся весьма значимыми, то есть глубина проникновения поля соизмерима или даже больше толщины металла трубы (тонкостенная заготовка).

Напомним, что характерной особенностью данного режима является ослабление силового воздействия вследствие появления ненулевой напряжённости магнитного поля на внешней поверхности трубчатой заготовки.

Данная ситуация весьма интересна с практической точки зрения, поскольку речь идёт о возможностях магнитно-импульсной технологии по обработке металлов с низкой электропроводностью (либо достаточно тонких).

Рассмотрим диффузионные процессы сквозь заготовку цилиндрической геометрии в случаях, характерных для реальных производственных процессов: сочленение с внутренним элементом из металла или обжим по форме оправки из диэлектрика.

Начнём с диффузии сквозь тонкостенную заготовку в случае индукторной системы, традиционной для магнитно-импульсной обработки металлов. Речь идёт об обжиме замкнутой проводящей оболочки по форме металлической матрицы в поле цилиндрического соленоида.

Расчетная модель, полученная мысленным поперечным разрезом исследуемой системы в области рабочей зоны, представлена на рис. 1 а.

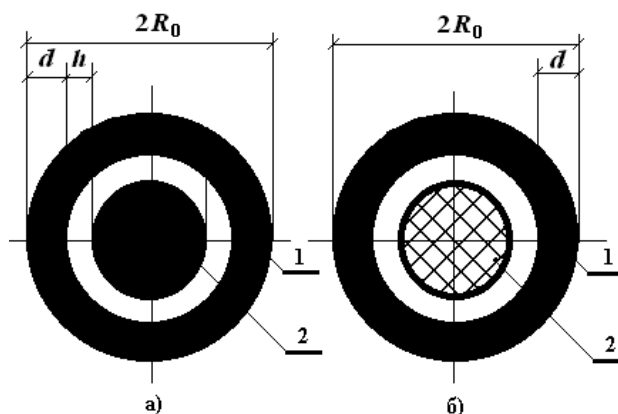


Рисунок 1 – Расчётная модель диффузионных процессов сквозь трубчатую заготовку при её обжиме по форме внутреннего элемента из металла (рис. 1 а) или диэлектрика (рис. 1 б): 1 – трубчатая заготовка; 2 – внутренний элемент,  $2R_0$  – внешний размер заготовки,  $d$  – её толщина,  $h$  – зазор между внутренним элементом и заготовкой

При решении поставленной задачи полагаем, что:

- имеет место круговая симметрия (пренебрегаем наличием разреза в области токоподводов);
- на внешней поверхности цилиндрической заготовки возбуждается только  $z$  – компонента напряжённости магнитного поля  $H_1(t)$  ( $z$  – направление, соответствующее оси, перпендикулярной плоскости чертежа на рис.2 а,  $t$  – время);
- толщина металла заготовки много меньше характерных размеров индукторной системы:  $\frac{d}{R_0} \ll 1$ ;
- внутренний элемент (матрица) выполнен из идеального проводника;
- зазор между заготовкой и матрицей достаточно мал, так что  $\frac{h}{R_0} \ll 1$ .

Уравнения Максвелла в полярной системе координат для составляющих напряженности электромагнитного поля ( $E_\varphi \neq 0$ ,  $H_z \neq 0$ ,  $\varphi$  – азимутальный угол), преобразованных по Лапласу с учетом нулевых начальных условий, можно записать в виде:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r \cdot E_\varphi(p, r)) = -\mu_0 p H_z(p, r); & (1) \\ -\frac{\partial H_z(p, r)}{\partial r} = \varepsilon_0 p E_\varphi(p, r); & (2) \\ -\frac{\partial H_z(p, r)}{\partial r} = \gamma E_\varphi(p, r); & (3) \end{cases}$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $\mu_0$  и  $\varepsilon_0$  – магнитная и диэлектрическая проницаемости вакуума;  $\gamma$  – электропроводность металла.

Из дифференциальной системы (1)–(3) получаем уравнение для напряжённости электрического поля в средах с различными электрофизическими характеристиками:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r \cdot E_\varphi(p, r)) \right) - k_{1,2}^2(p) \cdot E_\varphi(p, r) = 0 \quad (4)$$

где  $k_{1,2}(p)$  – волновые числа,

$$\begin{cases} k_1(p) = \frac{p}{c} \text{ (ддл областей с диэлектрическим заполнением),} \\ k_1(p) = c \text{ - скорость света вакууме,} \\ k_2(p) = \sqrt{p\mu_0\gamma} \text{ (ддл областей с конечной проводимостью).} \end{cases}$$

Фундаментальная система решений уравнения (4) есть модифицированные функции Бесселя первого порядка –  $I_1(z)$ ,  $K_1(z)$ .

Соответственно, общие интегралы для напряжённости электрического поля запишутся в виде:

а) в воздушном зазоре между заготовкой и идеально проводящей матрицей,  $r \in [(R_0-d-h), (R_0-d)]$ :

$$E_\varphi^1(p, r) = A(p) \cdot I_1(k_1(p) \cdot r) + B(p) \cdot K_1(k_1(p) \cdot r), \quad (5)$$

б) в металле тонкостенной заготовки,  $r \in [(R_0-d), R_0]$ :

$$E_\varphi^2(p, r) = C(p) \cdot I_1(k_2(p) \cdot r) + D(p) \cdot K_1(k_2(p) \cdot r), \quad (6)$$

где  $A(p)$ ,  $B(p)$ ,  $C(p)$ ,  $D(p)$  – произвольные постоянные интегрирования.

Выражения (5) и (6) подставим в уравнение (1). В результате получим формулы для напряжённости магнитного поля в выделенных областях:

а) в пространстве между матрицей и заготовкой,  $r \in [(R_0-d-h), (R_0-d)]$ :

$$H_z^1(p, r) = -\frac{1}{Z_0} (A(p) \cdot I_0(k_1(p) \cdot r) - B(p) \cdot K_0(k_1(p) \cdot r)), \quad (7)$$

б) в металле тонкостенной заготовки,  $r \in [(R_0-d), R_0]$ :

$$H_z^2(p, r) = -\sqrt{\frac{\gamma}{p\mu_0}} (C(p) \cdot I_0(k_2(p) \cdot r) - D(p) \cdot K_0(k_2(p) \cdot r)), \quad (8)$$

где  $Z_0$  – волновое сопротивление вакуума,  $I_0(z)$ ,  $K_0(z)$  – модифицированные функции Бесселя нулевого порядка.

Неизвестные произвольные постоянные интегрирования в выражениях для компонент векторов электромагнитного поля можно найти с помощью соответствующих граничных условий и выразить их, в конечном итоге, через величины операторных форм напряжённости магнитного поля на поверхностях обрабатываемой тонкостенной

цилиндрической заготовки –  $H_1(p)$  (внешняя поверхность:  $r = R_0$ ) и  $H_2(p)$  (внутренняя поверхность:  $r = (R_0-d)$ ,  $H_2(p) = L\{H_2(t)\}$ ).

Для диэлектрического зазора между матрицей и заготовкой произвольные постоянные интегрирования могут быть найдены из граничных условий:  $E_\varphi^1(p, (R_0 - d - h)) = 0$  и  $H_z^1(p, R_0 - d) = H_2(p)$ .

В выражении (5) связь между  $A(p)$  и  $B(p)$  находим из условия равенства нулю касательной компоненты напряжённости электрического поля на поверхности идеального проводника. Тем самым исключаем одну из неизвестных констант. С помощью зависимости (7) выражаем оставшуюся произвольную постоянную через  $L$  – образ напряжённости магнитного поля на внутренней поверхности обрабатываемой заготовки –  $H_2(p)$ .

После тождественных преобразований получаем выражение для азимутальной составляющей напряжённости электрического поля в диэлектрическом зазоре –  $r \in [(R_0-d-h), (R_0-d)]$ :

$$E_\varphi^1(p, r) = -Z_0 \cdot H_2(p) \cdot \frac{f_3(r)}{f_4(p)}, \quad (9)$$

где  $f_3(r) = K_1(k_1(p) \cdot (R_1 - h)) \cdot I_1(k_1(p) \cdot r) - I_1(k_1(p) \cdot (R_1 - h)) \cdot K_1(k_1(p) \cdot r)$ ,

$$f_4(p) = K_1(k_1(p) \cdot (R_1 - h)) \cdot I_0(k_1(p) \cdot R_1) - I_1(k_1(p) \cdot (R_1 - h)) \cdot K_0(k_1(p) \cdot R_1), R_1=R_0-d.$$

Аналогичным образом, в формуле (8) неизвестные произвольные постоянные интегрирования  $C(p)$  и  $D(p)$  выражаем через изображения напряжённостей магнитного поля на внутренней и внешней поверхностях заготовки. Полученные результаты подставляем в выражение (6).

В конечном итоге, после тождественных преобразований и введения упрощающих обозначений находим, что в металле заготовки ( $r \in [(R_0-d), R_0]$ ) радиальное распределение электрического поля будет описываться зависимостью:

$$E_\varphi^2(p, r) = -\sqrt{\frac{p\mu_0}{\gamma}} (H_1(p) \cdot f_1(r) - H_2(p) \cdot f_2(r)), \quad (10)$$

$$\text{где } f_1(r) = \frac{I_0(k_2(p) \cdot R_1) \cdot K_1(k_2(p) \cdot r) + I_1(k_2(p) \cdot r) \cdot K_0(k_2(p) \cdot R_1)}{\Delta},$$

$$f_2(r) = \frac{K_0(k_2(p)(R_1 + d)) \cdot I_1(k_2(p) \cdot r) + K_1(k_2(p) \cdot r) \cdot I_0(k_2(p)(R_1 + d))}{\Delta},$$

$$\Delta = K_0(k_2(p)R_1) \cdot I_0(k_2(p)(R_1 + d)) - K_0(k_2(p)(R_1 + d)) \cdot I_0(k_2(p)R_1).$$

Выражения (9) и (10) можно упростить, если учесть реальные условия работы индукторных систем при магнитно-импульсной обработке металлов.

Для конкретных оценок будем ориентироваться на ранее проведенные эксперименты [5, 6], где рабочие частоты не превышали 50–70 кГц, а толщина обрабатываемой медной фольги составляла ~ 50 мкм. В этом случае имеет место оценка:

$$\omega \cdot \tau < 0,1 \ll 1, \quad (11)$$

где  $\tau$  – характерное время диффузии поля,  $\tau = \mu_0 \gamma d^2$ .

Напомним, что по существу, неравенство (11) представляет собой условие тонкостенности деформируемого металла:

$$\begin{cases} \omega \cdot \tau \cdot \frac{R_1}{d} > 10 \gg 1; \\ \frac{\omega}{c} \cdot R_1 < 0,1 \ll 1. \end{cases} \quad (12)$$

Совокупность неравенств – (11) и (12) соответствуют предельным оценкам аргументов в выражениях (9), (10).

Неравенства (13) позволяют воспользоваться асимптотическими представлениями и разложениями в окрестности нуля для модифицированных функций Бесселя.

Выполняя предельные переходы в выражениях (9) и (10), получаем простые аналитически «прозрачные» зависимости для азимутальных компонент напряжённости

$$\begin{cases} |k_1(p) \cdot R_1| \ll 1; \\ |k_2(p) \cdot R_1| \gg 1; \\ |k_2(p) \cdot d| \ll 1. \end{cases} \quad (13)$$

электрического поля в полости между матрицей и заготовкой и собственно в металле тонкостенной цилиндрической заготовки:

$$E_\varphi^1(p, r) \cong \frac{p\mu_0 H_2(p)}{2} \cdot \frac{(r^2 - (R_1 - h)^2)}{r}, \quad (14)$$

$$E_\varphi^2(p, r) \cong \frac{1}{(\gamma \cdot d)} \cdot (H_1(p) - H_2(p)). \quad (15)$$

Как и следовало ожидать, электрическое поле (15) в тонком проводящем слое распределено равномерно по толщине.

Воспользуемся непрерывностью касательных составляющих напряжённости электрического поля на границе раздела различных сред и приравняем касательные составляющие напряжённости электрического поля (14) и (15) на границе раздела сред –  $r = R_1 = (R_0 - d)$ . Пренебрегая бесконечно малыми величинами второго порядка относительно  $\left(\frac{h}{R_0 - d}\right)$ , найдём связь между  $H_1(p)$  и  $H_2(p)$ :

$$H_2(p) = H_1(p) \cdot G_1(p), \quad (16)$$

где  $G_1(p)$  – операторный коэффициент экранирования магнитного поля металлом тонкостенной цилиндрической заготовки при его проникновении в полость, ограниченную идеально проводящей матрицей:

$$|G_1(p)| = \frac{1}{1 + p \cdot T_1}, \quad T_1 = \tau \cdot \left(\frac{h}{d}\right).$$

Выполним приближённую оценку величины коэффициента экранирования –  $G_1(p)$  для характерных параметров исследуемой конструкции индукторной системы: частота  $\sim 60$  кГц,  $d = 5 \cdot 10^{-5}$  м,  $R_0 = 5 \cdot 10^{-2}$  м,  $h = 10^{-3}$  м.

В терминах формулы (16) получаем, что  $\omega \cdot \tau = 0,071$ ;  $\omega \cdot T_1 = 1,42$  и  $|G_1(p)| \cong \frac{1}{1 + \omega \cdot T_1} \cong 0,41$ . То есть, в случае металлической матрицы сквозь заготовку проникает  $\sim 41\%$  внешнего магнитного поля (в степени достоверности этой оценки мы убедимся несколько позже на конкретном примере, где будет выполнено строгое обратное

преобразование Лапласа в выражении (16) при заданной временной функции поля индуктора).

Следует отметить, что данная величина коэффициента экранирования будет наименьшей, так как при движении заготовки  $h \rightarrow 0$  и  $|G_1(p)| \rightarrow 1$ . То есть, в динамике, силовое воздействие со стороны магнитного поля будет резко падать и, в конечном итоге, начиная с какого-то значения воздушного зазора  $-h(t)$  (как функции времени), прекратится совсем.

Перейдём к диффузии сквозь тонкостенную заготовку в индукторной системе, предназначенной для обжима замкнутой проводящей оболочки по форме диэлектрической матрицы в поле цилиндрического соленоида.

Расчетная модель, полученная мысленным поперечным разрезом исследуемой системы в области рабочей зоны, представлена на рис. 1 б.

При тех же допущениях, что и ранее, аналогично запишем общие интегралы для компонент действующего электромагнитного поля в пространстве  $L$  – изображений.

Для напряжённости электрического поля получаем, что:

а) во внутреннем пространстве трубчатой заготовки,  $r \in [0, (R_0-d)]$ , условию ограниченности в нуле пространственной переменной удовлетворяет функция:

$$E_{\varphi}^1(p, r) = A(p) \cdot I_1(k_1(p) \cdot r), \quad (17)$$

б) в металле тонкостенной заготовки,  $r \in [(R_0-d), R_0]$ :

$$E_{\varphi}^2(p, r) = C(p) \cdot I_1(k_2(p) \cdot r) + D(p) \cdot K_1(k_2(p) \cdot r), \quad (18)$$

где  $A(p)$ ,  $B(p)$ ,  $C(p)$ ,  $D(p)$  – произвольные постоянные интегрирования.

Выражения (17) и (18) подставим в уравнение (1). В результате получим формулы для напряжённости магнитного поля в выделенных областях:

а) в пространстве между матрицей и заготовкой,  $r \in [0, (R_0-d)]$ :

$$H_z^1(p, r) = -\frac{1}{Z_0} A(p) \cdot I_0(k_1(p) \cdot r); \quad (19)$$

б) в металле тонкостенной заготовки,  $r \in [R_0, (R_0-d)]$ ,  $H_z^2(p, r)$  найдем аналогично (8).

Так же как и ранее, неизвестные произвольные постоянные интегрирования в выражениях для компонент векторов электромагнитного поля можно найти с помощью соответствующих граничных условий и выразить их, в конечном итоге, через величины операторных форм напряжённости магнитного поля на поверхностях обрабатываемой тонкостенной цилиндрической заготовки –  $H_1(p)$  (внешняя поверхность:  $r = R_0$ ) и  $H_2(p)$  (внутренняя поверхность:  $r = (R_0-d)$ ,  $H_2(p) = L\{H_2(t)\}$ ).

После тождественных преобразований получаем выражение для азимутальной составляющей напряжённости электрического поля во внутренней полости трубчатой заготовки –  $r \in [0, (R_0-d)]$ :

$$E_{\varphi}^1(p, r) = -Z_0 \cdot H_2(p) \cdot \frac{I_1(k_2(p) \cdot r)}{I_0(k_2(p) \cdot (R_0 - d))}. \quad (20)$$

Аналогичным образом, в формуле (8) неизвестные произвольные постоянные интегрирования  $C(p)$  и  $D(p)$  выражаем через изображения напряжённости магнитного поля на внутренней и внешней поверхностях заготовки.

Полученные результаты подставляем в выражение (18).

В конечном итоге, после тождественных преобразований и введения упрощающих обозначений находим, что в металле заготовки ( $r \in [(R_0-d), R_0]$ ) радиальное распределение электрического поля будет описываться зависимостью:

$$E_{\varphi}^2(p, r) = -\sqrt{\frac{p\mu_0}{\gamma}}(H_1(p) \cdot f_1(r) - H_2(p) \cdot f_2(r)), \quad (21)$$

$$\text{где } f_2(r) = \frac{K_0(k_2(p) \cdot R_0) \cdot I_1(k_2(p) \cdot r) + K_1(k_2(p) \cdot r) \cdot I_0(k_2(p) \cdot R_0)}{\Delta},$$

$$\Delta = K_0(k_2(p)R_1) \cdot I_0(k_2(p) \cdot R_0) - K_0(k_2(p) \cdot R_0) \cdot I_0(k_2(p)R_1).$$

Так же как и прежде, выражения (20) и (21) можно упростить, если учесть реальные условия работы индукторных систем при магнитно-импульсной обработке металлов [5, 6]. Принимаем, что рабочие частоты не превышают 50–70 кГц, а толщина обрабатываемой медной фольги составляет  $\sim 50$  мкм.

В этом случае имеет место оценка (11)–(16):

$$E_{\varphi}^1(p, r) \cong \frac{p\mu_0 H_2(p)}{2} \cdot r \quad (22)$$

$$G_2(p) = \frac{1}{1 + p \cdot T_2}, \quad T_2 = \tau \cdot \left( \frac{R_0 - d}{2d} \right).$$

Первое, что следует отметить, это достоверность полученного результата.

Полученное значение  $H_2(p)$  является аналогичным (16) и согласуется с аналогичным выводом, полученным в [8] при решении задачи о диффузии поля в замкнутую полость, ограниченную проводящими стенками малой толщины.

Выполним приближённую оценку величины коэффициента экранирования –  $G_2(p)$  для характерных параметров исследуемой конструкции индукторной системы: частота  $\sim 60$  кГц,  $d = 5 \cdot 10^{-5}$  м,  $R_0 = 5 \cdot 10^{-2}$  м,  $h = 10^{-3}$  м.

В терминах формулы (16) получаем, что  $\omega \cdot \tau = 0,071$ ;  $\omega \cdot T_2 = 35,5$  и  $|G_2(p)| \cong \frac{1}{1 + \omega \cdot T_2} \cong 0,027$ . То есть, в случае внутренней матрицы из диэлектрика сквозь заготовку проникает всего лишь  $\sim 2,7$  % внешнего магнитного поля.

Выражение для операторного коэффициента экранирования  $G_2(p)$  позволяет оценить величину внутреннего радиуса тонкостенной трубчатой заготовки, для которого диффузионные процессы становятся весьма значимыми.

При той же величине  $\omega \cdot \tau = 0,071$ ; но  $\omega \cdot T_2 = 1,42$  сквозь стенки заготовки проникает уже  $\sim 41$  % действующего поля индуктора, так как  $|G_2(p)| \cong 0,41$ .

Эти цифры совпадают с оценками, полученными при рассмотрении диффузионных процессов для обжима трубчатой заготовки по форме внутренней металлической матрицы. То есть, при рабочей частоте  $\sim 60$  кГц диффузия поля сквозь заготовку толщиной  $d = 5 \cdot 10^{-5}$  м будет достаточно интенсивной только для труб с очень малым внутренним размером,  $R_0 - d \approx 2 \cdot 10^{-3}$  м. С уменьшением частоты прямо пропорционально возрастает соответствующий внутренний размер обрабатываемой заготовки. Так, при частоте  $\sim 10$  кГц получаем, что  $R_0 - d \approx 12 \cdot 10^{-3}$  м. И при этой же частоте внутренний диаметр, для которого диффузия поля индуктора не превышает 10%, должен быть не менее  $\sim 7,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Перейдём к оригиналам в выражении (16), характеризующих диффузионные процессы при обжиме трубчатых заготовок по форме металлических и диэлектрических матриц [9, 10]. Обычная временная зависимость для напряжённости поля индуктора, как следует из многочисленных экспериментов, описывается экспоненциально затухающей синусоидой, то есть  $H_1(t) = H_{m1} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ ,  $H_{m1}$  – амплитуда,  $\delta$  – декремент затухания,  $\omega$  – циклическая частота,  $t$  – время. С учётом принятого вида  $H_1(t)$  из (16) найдём отношение амплитуд проникшего и действующего полей.

$$\frac{H_{m2}}{H_{m1}} = \frac{e^{\frac{\pi \delta}{2\omega} (1 - \delta \cdot T_{1,2} + \omega \cdot T_{1,2} \cdot e^{\frac{\pi}{2\omega T_{1,2}} (1 - \delta T_{1,2})})}}{1 + \omega \cdot T_{1,2} \cdot (\omega T_{1,2} - \frac{\delta}{\omega} (2 - \delta T_{1,2}))} \quad (23)$$

Как следует из полученного результата, диффузионные процессы при обжиге трубчатых заготовок по форме матриц из материалов различной физической природы протекают совершенно идентично. Наличие диэлектрической матрицы, практически, соответствует увеличению зазора –  $h$  в случае матрицы из металла с высокой электропроводностью. Выражение (29) в функциональной зависимости от  $\omega \cdot T_{1,2}$  представлено графиками на рис. 2.

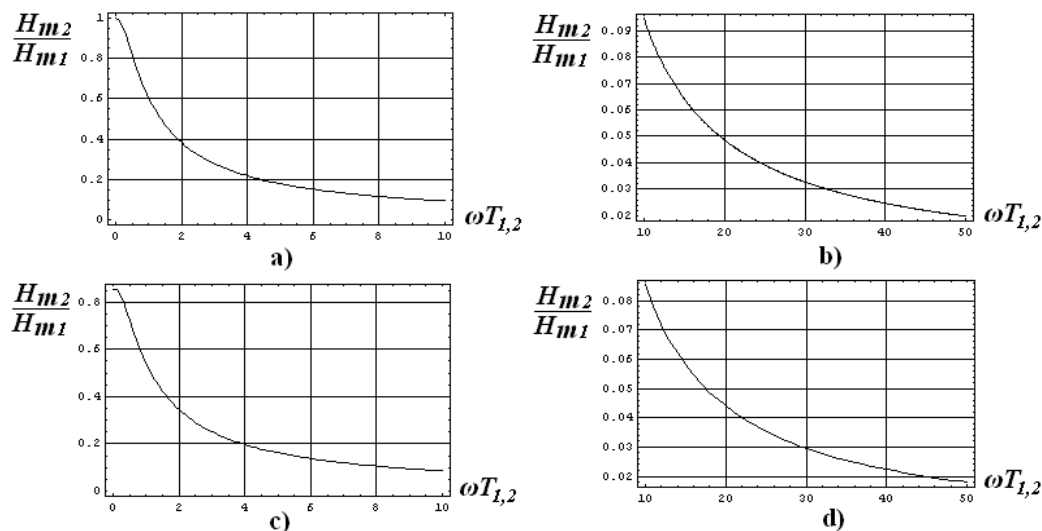


Рисунок 2 – Проникновение касательной компоненты напряжённости магнитного поля во внутреннюю полость трубчатой цилиндрической заготовки, а), б)  $\delta = 0$ ; в), д)  $\delta = 0,1 \cdot \omega$

Результаты вычислений позволяют производить количественные оценки параметров диффузионных процессов при обжиге тонких металлических труб и прогнозировать наиболее возможную эффективность соответствующей производственной операции.

В заключение оценим достоверность приближённых расчётов, выполненных ранее по формулам для операторных коэффициентов экранирования.

Так, при проникновении сквозь металл трубы в полость между её стенками и поверхностью проводящей матрицей было получено, что  $|G_1(p)| \cong 0,41$ . В случае диэлектрической матрицы для тех же условий было вычислено, что  $|G_2(p)| \cong 0,027$ .

Строгие оценки, выполненные с помощью формулы (23), показывают, что в рассмотренных ситуациях для разных декрементов затухания модули коэффициентов экранирования будут равны:  $|G_1(p)| \cong 0,437 \div 0,487$  и  $|G_2(p)| \cong 0,025 \div 0,028$ . Эти данные свидетельствуют в пользу достоверности ранее выполненных приближённых оценок.

Вернёмся к результатам расчёта зависимости количественных показателей диффузии поля сквозь стенки трубчатой металлической заготовки от обобщённого параметра  $\omega \cdot T_{1,2}$ , приведенными на рис. 2.

Данные графики, безусловно, иллюстрируют электромагнитные процессы при «обжиге», но не являются наглядными с точки зрения непосредственных представлений о влиянии геометрических параметров индукторной системы и обрабатываемого объекта в их взаимосвязи с временными характеристиками действующего поля.

Для определённого восполнения отмеченного недостатка приведём дополнительно результаты вычислений относительной напряжённости магнитного поля, проникшего сквозь стенки трубчатой стальной заготовки конкретными поперечными размерами.



Отметим, что для рабочих частот принятых в расчётах толщина стенок обрабатываемой трубчатой заготовки (0,0005 м) существенно меньше эффективной глубины проникновения поля в соответствующую проводящую среду (при 5 кГц и 10 кГц величина скин-слоя будет составлять 0,0029 м и 0,002 м, соответственно).

На количественные показатели диффузионных процессов в рассматриваемой операции величина относительного декремента затухания ( $\delta \approx 0,1$  – рис. 3 а) и с) в зависимости от величины рабочего зазора и  $\delta \approx 0,2$  – рис. 3 б) и d) в зависимости от внутреннего радиуса) рис. 3.

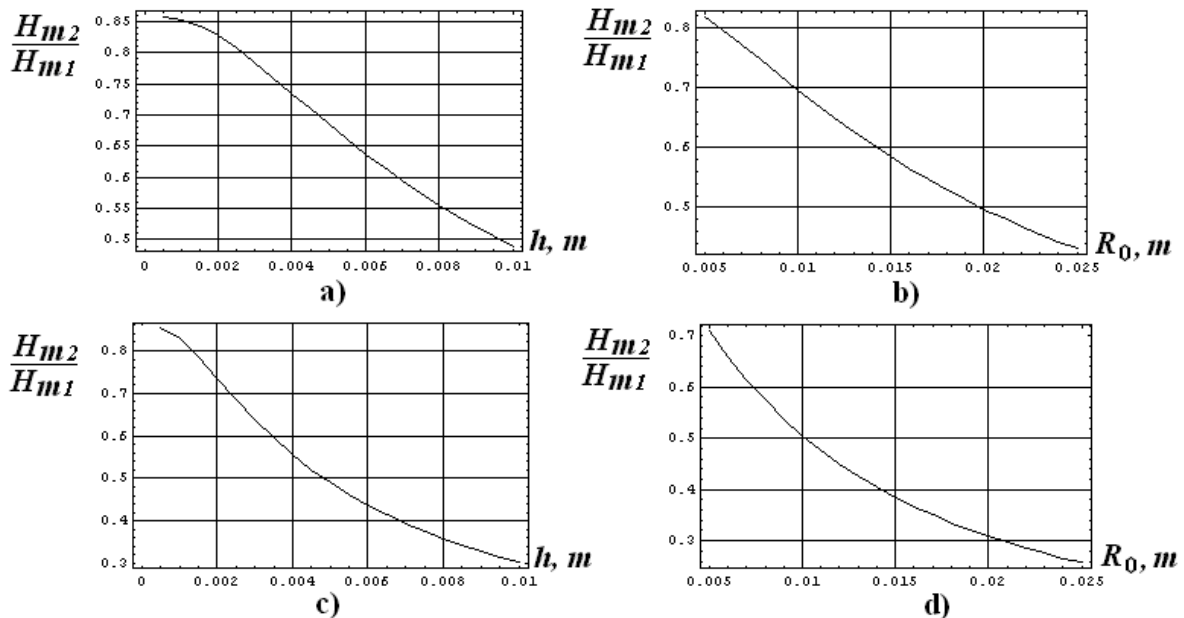


Рисунок 3 – Относительная напряжённость магнитного поля с рабочей частотой  $f = 5 \text{ кГц}$ , действующего на трубчатую стальную заготовку с толщиной  $d = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

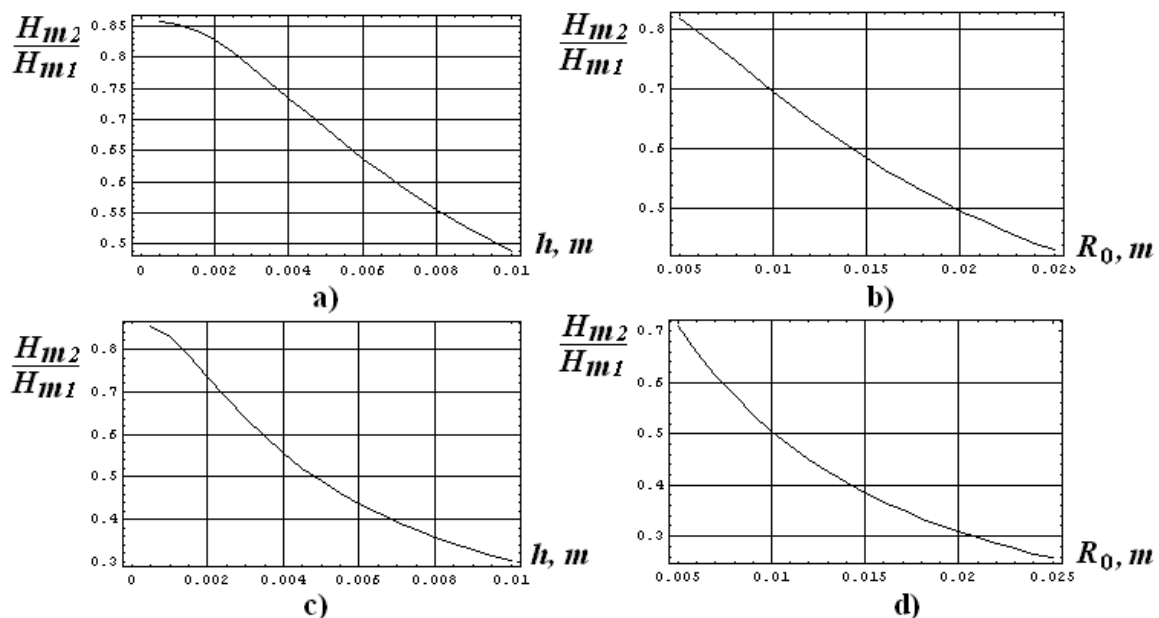


Рисунок 4 – Относительная напряжённость магнитного поля, действующего на трубчатую стальную заготовку (рабочие частоты  $f = 5 \text{ кГц}$  и  $f = 10 \text{ кГц}$ , соответственно, относительный декремент затухания  $\delta \approx 0,1$ ):

а) и с) при наличии проводящей матрицы в зависимости от величины рабочего зазора; б) и d) при наличии диэлектрической матрицы в зависимости от внутреннего радиуса

Наконец, кривые на рис. 5, в отличие от всех ранее представленных зависимостей, иллюстрируют процессы проникновения поля в терминах силового воздействия на

обрабатываемую заготовку. Здесь приведены величины относительного снижения давления при различных значениях геометрических параметров исследованной системы.

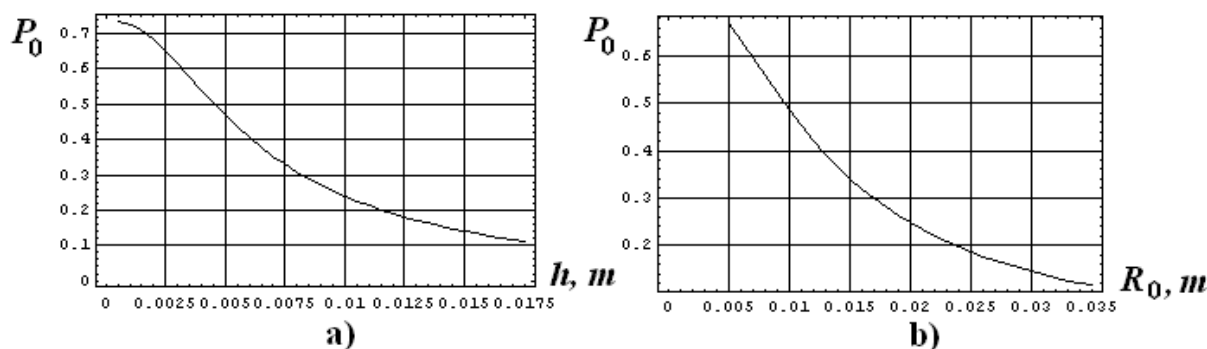


Рисунок 5 – Относительное давление магнитного поля (рабочая частота  $f = 5$  кГц, относительный декремент затухания  $\delta \approx 0,1$ ), действующее на стенки трубчатой стальной заготовки толщиной  $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м:

а) при наличии проводящей матрицы в зависимости от величины рабочего зазора; б) при наличии диэлектрической матрицы в зависимости от внутреннего радиуса заготовки

**Выводы.** Уменьшение рабочего зазора между обрабатываемой заготовкой и проводящей матрицей от 17,5 мм до 0,5 мм приводит к снижению силы действующего магнитного давления почти на 65 %. Однако, здесь следует указать, что для давлений – это завышенные цифры, поскольку матрица полагалась идеально проводящей. Реально же, снижение амплитуд действующих сил будет несколько меньше. В первом приближении эта поправка может быть оценена прибавлением к величине рабочего зазора значения эффективной глубины проникновения поля в проводящую среду, из материала которой изготавливается матрица. В случае деформирования трубчатой заготовки на диэлектрическую матрицу (либо это будет свободный «обжим») вариация внутреннего поперечного размера трубчатой заготовки в интервале диаметров от 70 до 10 мм приводит к снижению давления на  $\sim 57$  %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями : монография / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 240 с.
2. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications / Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier, 2013. – № 213 (3). – P. 444–452.
3. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / Белый И. В., Фертик С. М., Хищенко Л. Т. – Харьков : Высшая школа, 1977. – 190 с.
4. Пат. 31309 України, В 21 Д 26/14. Индуктор для магнітно-імпульсного формування кутів у вигнутих листових металевих заготовках / Батыгин Ю. В., Чаплигин Е. А., Сериков Г. С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200701443; заявл. 12.02.2007; опубл. 10.04.08, Бюл. №7.
5. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов / Батыгин Ю. В., Лавинский В. И. – Харьков : Изд. «МОСТ-Торнадо», 2002. – 284 с.
6. Батыгин Ю. В., Лавинский В. И. Электромагнитные процессы в индукторной системе для штамповки печатных плат // Электричество. – 2001. – № 1. – С.44–48.
7. Батыгин Ю. В., Лавинский В. И. Особенности магнитно-импульсной «раздачи» тонкостенных трубчатых заготовок // Электричество. – 2005. – № 11. – С.62–68.
8. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 196 с.
9. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. – М. : Изд. «Наука», 1977. – 342 с.

10. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике. – М. : Изд. «Наука», 1973. – 832 с.

## REFERENCES

1. Умпульсные махнытныє полія длія прохрессывных технологій. Том 3. Теорія у експеримент прятязненія тонкостенных металлов умпульсному махнытному поліаму: монографія [Текст] / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыһын, А. В. Ннатов // Kharkiv: KhNADU, 2009 – 240 s.
2. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications Journal of Materials Processing Technology [Text] / Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // Elsevier. – 2013. – # 213 (3). – P. 444–452.
3. Spravochnyk po mahnytno-umпульсноі obrabotke metallov [Tekst] / Belii Y.V., Fertyk S.M., Khymentko L.T. // Kharkov: Visshaia shkola. 1977. – 190 s.
4. Pat. 31309 Ukrainy, V 21 D 26/14. Induktor dlia mahnitno-impulsnoho formuvannia kutiv u vyhnutykh lystovykh metalevykh zahotivkakh / Batyһyn Yu.V., Chaplyhin E.A., Serykov H.S.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Kharkivskiy nats. avtom.-dorozhn. un-t. –# u200701443; zaiavl. 12.02.2007; opubl. 10.04.08, Biul. #7.
5. Mahnytno-umпульснаіа obrabotka tonkostennykh metallov [Tekst] / Batyһyn Yu.V., Lavynskiy V.Y. // Kharkov: Yzd. «MOST-Tornado». 2002. – 284 s.
6. Электромахнытныє протсессы v ynduktornoі systeme dlia shtampovky pechatnykh plat [Tekst] / Bатыһын Yu.V., Lavynskiy V.Y. // Elektrychestvo. – 2001. – #1. – S.44-48.
7. Osobennosti mahnytno-umпульсноі «razdachy» tonkostennykh trubchatykh zahotovok [Tekst] / Bатыһын Yu.V., Lavynskiy V.Y. // Elektrychestvo. – 2005. – # 11. – S.62-68.
8. Polia y perekhodnyє протсессы v apparature sverkhshynnykh tokov [Tekst] / Shneerson H.A. // L: Enerhoizdat. – 1981. – 196s.
9. Spetsyalnyє funktsyy [Tekst] / Yanke E., Emde F., Lesh F. // M: Yzd. «Nauka». 1977. – 342s.
10. Spravochnyk po matematyke [Tekst] / H.Korn, T.Korn. // M: Yzd. «Nauka». 1973. – 832 s.

### **Волонцевич Д. О., Барбашова М. В., Єрьоміна Є. Ф. ДИФУЗІЙНІ ПРОЦЕСИ ПРИ «ОБТИСКУ» ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК ПРИ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ**

*У статті проведений аналіз електродинамічних процесів при обтиску трубчастих заготовок, в умовах значних дифузійних ефектів, індукторною системою для традиційної магнітно-імпульсної обробки металів. Досліджені електромагнітні процеси за допомогою математичного апарату теорії електромагнітного поля, рішення встановлених крайових задач проведених аналітичними методами математичної фізики з наступною комп'ютерною обробкою отриманих результатів. Результати розрахунків дозволяють проводити кількісні оцінки параметрів дифузійних процесів при обтиску тонких металевих труб та прогнозувати найбільш вірогідну ефективність відповідної виробничої операції. Показано, що дифузійні процеси при обтиску трубчастих заготовок по формі матриці з матеріалів різної фізичної природи протікають абсолютно ідентично. Наявність діелектричної матриці, практично, відповідає збільшенню зазору, в разі якщо матриця з металу та має високу електропровідність. Дані рекомендації щодо практичного здійснення технологічної операції обтиск при формуванні тонкостінних трубчастих заготовок величинами відносного зниження тиску при різних значеннях геометричних параметрів системи, що досліджувалась.*

**Ключові слова:** роздача труб, обтиск, скін-ефект, магнітно-імпульсна обробка.

**Volontsevich D.O., Barbashova M.V., Eremin E.F. DIFFUSION PROCESSES DURING «CRIMPING» OF TUBULAR BILLETS IN MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF METALS**

*The article analyzes the electrodynamic processes during the clamping of tubular blanks, under conditions of significant diffusion effects, by an inductor system for the traditional magnetic-pulse treatment of metals. Electromagnetic processes are investigated with the help of the mathematical apparatus of the theory of the electromagnetic field the solution of the assigned boundary value problems is carried out by analytical methods of mathematical physics with subsequent computer processing of the results obtained. The results of the calculations make it possible to make quantitative estimates of the parameters of diffusion processes during the crimping of thin metal pipes and to predict the most possible efficiency of the corresponding production operation. It is shown that the diffusion processes in the compression of tubular blanks in the form of matrices from materials of different physical nature result quite identically. The presence of a dielectric matrix, in practice, corresponds to an increase in the gap in the case of a matrix of a metal with a high electrical conductivity. Recommendations are given on the practical implementation of the technological operation of crimping when forming thin-walled tubular billets with the values of relative pressure reduction for different values of the geometric parameters of the system studied.*

**Keywords:** expansion of pipe, crimping, skin-effect, magnetic-pulse treatment.

© Волонцевич Д. О., Барбашова М. В., Єрємїна Є. Ф.

Статтю прийнято  
до редакції 24.10.17