

## ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИИ ОБЪЕКТА ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛА

*У статі розглянуто динаміку деформації циліндричної трубки під впливом дії на неї магнітного поля.*

*В статті розглянуто динаміку деформації циліндричної трубки при впливі на неї магнітного поля.*

Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ) является одним из видов обработки металлов давлением. Однако, в отличие от традиционных способов, обработка осуществляется в холодном состоянии металла под воздействием электромагнитного поля. В научной литературе существует достаточно большое количество статей, посвящённых этой тематике. Причем, во многих статьях приводится аналитическое решение задачи относительно преобразованных по Лапласу функций электромагнитного поля. Кроме того, расчет, как правило, ограничивается формулами, определяющими поверхностное магнитное давление на заготовку. Описанный выше подход имеет некоторые недостатки: обратное преобразование Лапласа для полученных функций представляет собой достаточно сложную задачу и далеко не всегда возможно; аналитическое решение задачи возможно только для простейших конфигураций индуктора и деформируемого объекта; задача МИОМ не ограничивается расчетом значений электромагнитных сил, необходимы расчеты напряжения и деформации заготовки.

В статье рассматриваются вопросы расчета сил и деформации алюминиевой трубки. Вид половины осесимметричной расчетной модели показан на рис. 1.

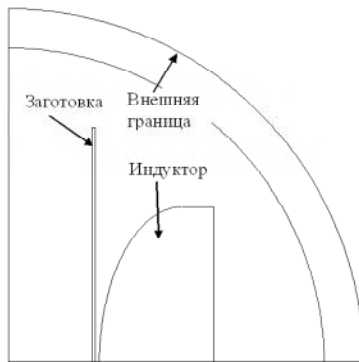


Рис. 1. Расчетная модель

В расчетной модели сделаны следующие допущения: деформируемая заготовка практически неподвижна; напряжение разрядного конденсатора приложено к сечению индуктора; не учитывается сопротивление токоподводящих проводов и переходное контактное сопротивление.

На первом этапе решалась задача расчета электромагнитного поля, создаваемого индуктором при разряде на него ёмкостного накопителя энергии.

Расчетные уравнения электромагнитного поля:

$$\sigma_k \cdot \frac{\partial A_k}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \cdot \mu_r^{-1} \cdot \nabla \times A_k) = (\sigma_k \cdot \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot r}) \cdot e_\phi; \quad (1)$$

$$A_k = A_{k\phi} \cdot e_\phi,$$

где  $\sigma$  – проводимость;  $A$  – векторный магнитный потенциал;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $U$  – напряжение, приложенное к индуктору;  $r$  – радиальная координата;  $e_\phi$  – орт.

Система (1) записана в общем виде, но для каждой из областей уравнение будет соответствовать физическим параметрам области. Система (1) дополнена граничными условиями симметричности и аксиальной симметричности, а также условиями внешней границы, имитирующей бесконечное пространство. Начальные условия нулевые.

Напряжение, приложенное к индуктору, определяется напряжением на ёмкости:

$$U = U_0 - \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt, \quad (2)$$

где  $U_0$  – начальное напряжение на ёмкости;  $C$  – ёмкость;  $i$  – ток индуктора.

Это напряжение уравнивается омическим падением напряжения в индукторе и напряжением, наводимым в индукторе электромагнитным полем. Для заготовки внешнее напряжение равно нулю.

Исходные данные: начальное напряжение на ёмкости – 2 кВ; ёмкость – 1000 мкФ; толщина цилиндра – 2 мм; половина высоты – 150 мм; материал индуктора – бронза, заготовки – алюминий; конечное расчетное время – 50 мкс; расчетный шаг – 0,1 мкс.

На рис. 2 показана временная зависимость тока индуктора.

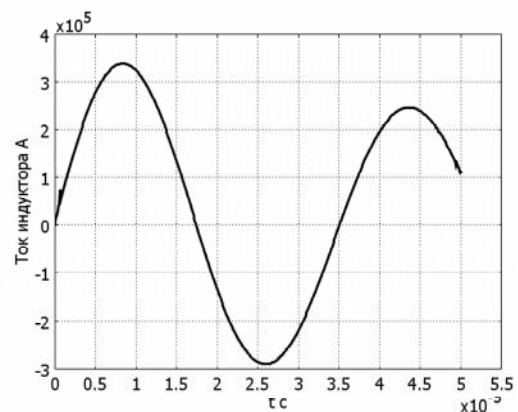


Рис. 2. Ток индуктора

На рис. 3 показано значение тока в алюминиевом цилиндре.

Из рис. 2, 3 следует, что амплитуды токов индуктора и заготовки практически равны (потери невелики). Что является одним из подтверждений правильности расчета (воздушный трансформатор тока с коэффициентом связи близким к единице).

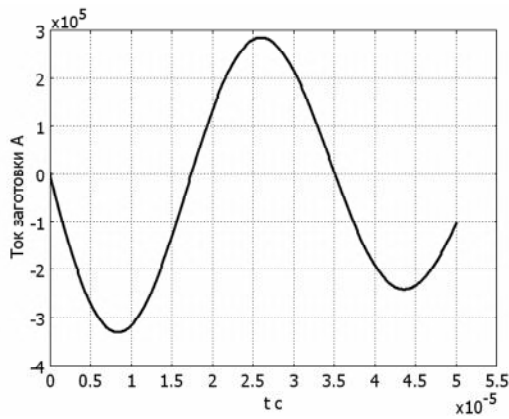


Рис. 3. Ток в заготовке

Очевидно, что наибольший интерес представляют значения объемных сил и давление на поверхность заготовки.

На рис. 4 показано значение силы Лоренца, действующей на заготовку.

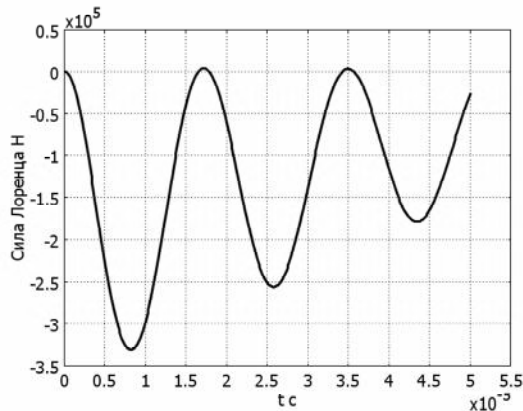


Рис. 4. Сила, действующая на заготовку

Из рис. 2-4 следует, что максимальное значение электромагнитной силы приходится на время порядка 8 мкс. Кроме того, как следует из рис. 4, в диапазоне времен  $(1,66 - 1,78) \cdot 10^{-5}$  с значение электромагнитной силы положительно (притяжение заготовки к индуктору). На рис. 5 показано значение этой силы. Такое значение силы можно объяснить сдвигом по фазе тока в заготовке относительно тока индуктора. Как следует из рис. 5, силы притяжения достаточно велики, но на порядок меньше сил отталкивания. Кроме того, время действия этих сил достаточно мало.

На рис. 6 показано распределение электромагнитного давления на внешнюю поверхность заготовки в момент достижения им максимального значения.

Такая форма распределения давления по высоте внешней поверхности цилиндрической заготовки определяется формой поверхности индуктора [3].

Временное изменение сил Лоренца в точках на внешней поверхности цилиндра с координатами 1) 55, 0; 2) 55, 10; 3) 55, 20 мм показано на рис. 7.

На рис. 8 показано изменение напряжения на емкости, из которого явно виден затухающий характер процесса.

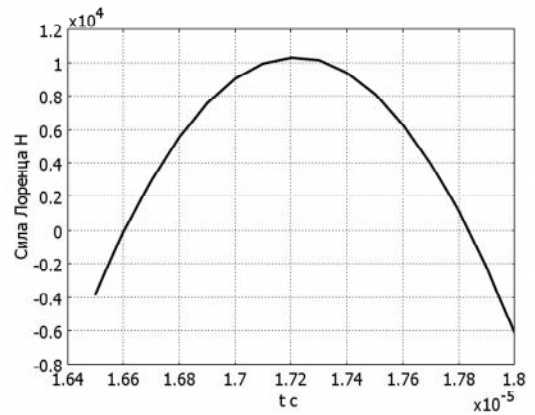


Рис. 5. Силы притяжения заготовки к индуктору

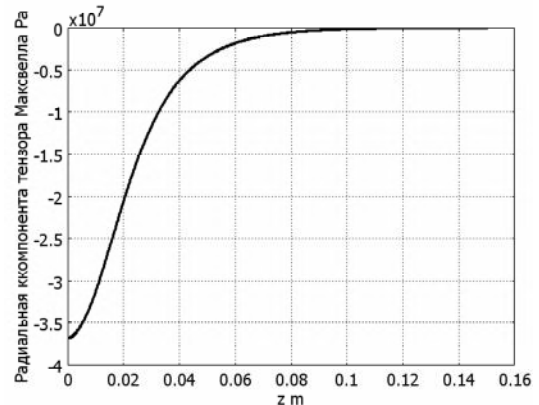


Рис. 6. Значения электромагнитного давления на поверхность заготовки

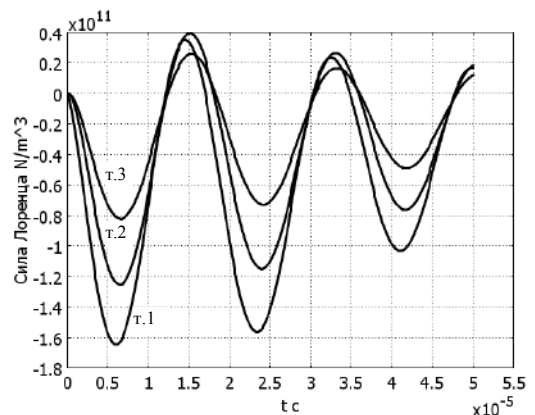


Рис. 7. Распределение объемных сил по высоте внешней поверхности цилиндрической заготовки

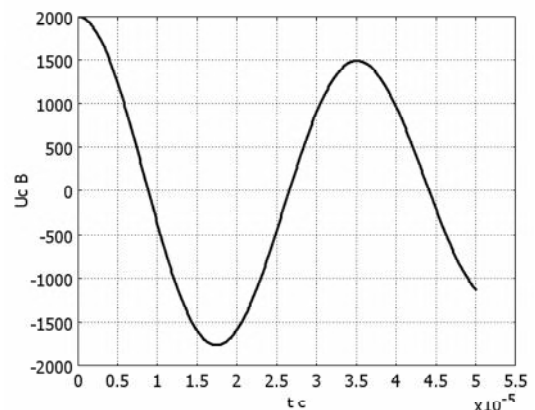


Рис. 8. Изменение напряжения на разрядной емкости

Из приведенных графиков следует, что частота разряда ёмкости на массивный одновитковый индуктор достаточно велика и составляет величину 28,5 кГц. Частота действия силы на заготовку составляет величину порядка 57 кГц. Вполне очевидно, что при таких малых временах действия силы при расчете деформации заготовки необходимо учитывать силы инерции.

При расчете деформаций заготовки были приняты следующие допущения:

- плотность материала заготовки постоянна;
- зависимость между деформацией и силой линейна (материал подчиняется закону Гука).

Последнее допущение не совсем верно, но в первом приближении решение такой задачи даёт возможность оценить силы и напряжения в заготовке без существенного усложнения математической модели.

Согласно теории упругости с учетом принятых допущений система уравнений равновесия твердого тела запишется [1, 2]:

$$(\lambda + G) \cdot \nabla \cdot \text{div}(\mathbf{u}) + G \cdot \nabla^2 \mathbf{u} - \rho \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \mathbf{f} = 0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор перемещений;  $\rho$  – плотность;  $\mathbf{f}$  – вектор объемных сил.

Константы в (3) определяются через известные величины, такие как модуль Юнга –  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  следующим образом:

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}; \quad G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}. \quad (4)$$

В (3) объёмными силами являются силы Лоренца, рассчитанные в предыдущей задаче и действующие на цилиндрическую заготовку. Для однозначности решения систему (3) с учетом (4) необходимо дополнить граничными условиями (начальные условия нулевые), показанными на рис. 9, где  $\mathbf{n}$  – вектор внешней нормали.

Остальные границы свободны и могут перемещаться в любом направлении. Такие условия имитируют расположение заготовки на жесткой матрице с возможностью движения заготовки по поверхности матрицы без учета сил трения.

Результаты расчета приведены на следующих рисунках. На рис. 10 показаны радиальные деформации точек внешней поверхности цилиндра с координатами 1) 55,0; 2) 55, 10; 3) 55,20 (мм).

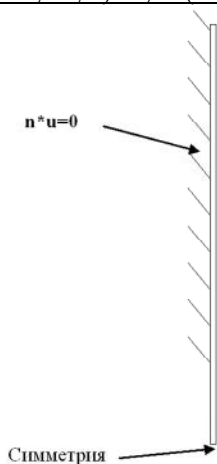


Рис. 9. Граничные условия для деформируемой заготовки

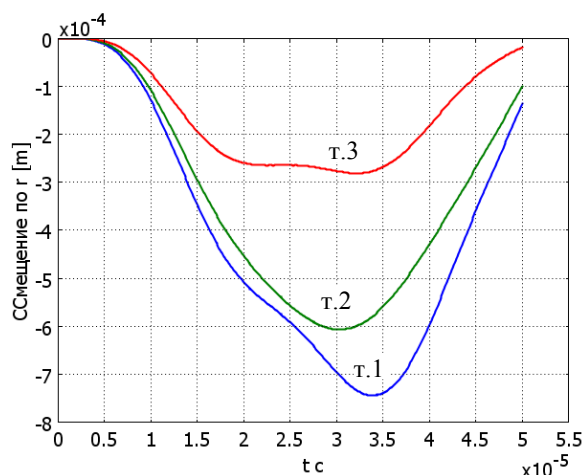


Рис. 10. Радиальные смещения точек поверхности цилиндра

Из рис. 10 следует, что максимальное значение деформации и максимальное значение деформирующей силы разнесены во времени, что подтверждает правильность положения о необходимости учета сил инерции. Достаточно велики и скорости деформации этих же точек, которые показанные на рис. 11.

Из рис. 11 видно запаздывание скорости деформации относительно деформирующей силы. Колебательный характер процесса, возможно, говорит о некоторой неустойчивости в решении задачи численным методом с выбранными параметрами решателя.

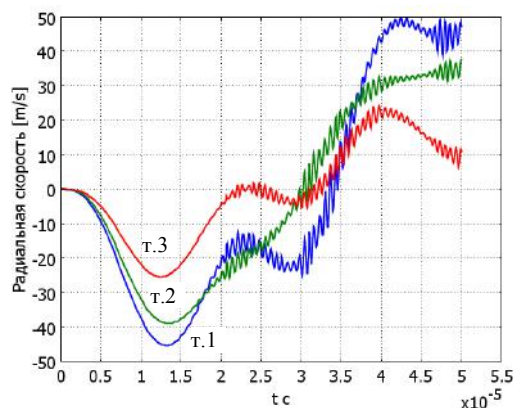


Рис. 11. Скорости деформации точек поверхности цилиндра

В процессе деформации важным являются значения напряжения в деформируемой заготовке. На рис. 12 показаны напряжения, возникающие на внешней поверхности цилиндрической заготовки по оси  $z$  в момент времени, соответствующий максимальной деформации.

Пик напряжения в районе координаты 0,03 м является результатом взаимодействия деформируемой заготовки с краем неподвижной матрицы.

На рис. 13 приведено распределение напряжений в заготовке.

На рис. 14 показана деформируемая часть заготовки в масштабе 10:1, а на рис. 15 показана временная зависимость тепловой мощности, выделяемой в деформируемой заготовке.

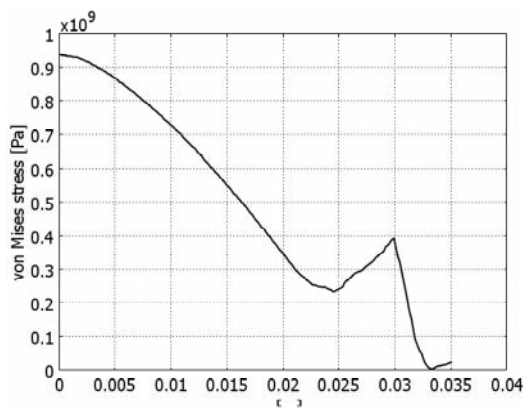


Рис. 12. Напряжения на внешней поверхности заготовки в момент максимальной деформации

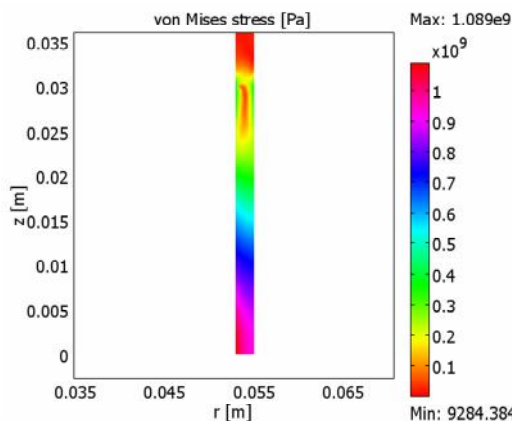


Рис. 13. Распределение напряжений по площади заготовки

### ВЫВОДЫ

1. Параметры электромагнитного поля и силы, действующие на деформируемую заготовку, в полном объеме могут быть рассчитаны только на основе соответствующей мультифизической модели численными методами.
2. За счет временного сдвига тока в заготовке относительно тока индуктора, сила Лоренца, действующая на заготовку знакопеременна.
3. Скоротечность электромагнитных процессов требует учета сил инерции при определении деформации заготовки.
4. Скорости деформации заготовки достаточно велики (до 50 м/с).
5. Механические напряжения, как на поверхности заготовки, так и по её сечению, превышают предел текучести материала, что свидетельствует о необходимости учета пластических деформаций в заготовке.
6. Выделяемая тепловая мощность в деформируемой заготовке достаточно велика и вопрос о влиянии температуры нагрева заготовки на её механические характеристики и внутренние напряжения требует дополнительного исследования.

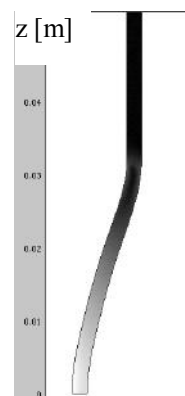


Рис. 14. Деформация заготовки

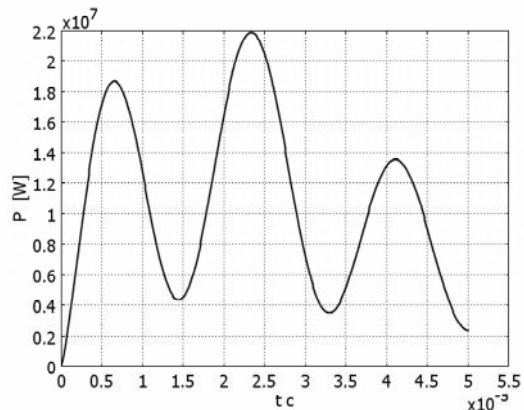


Рис. 15. Выделяемая тепловая мощность в деформируемой заготовке

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Я.И. Френкель. Курс теоретической механики. – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с.
2. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ./ Под редакцией Шапиро Г.С. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.
3. О.Я. Коновалов. Экспериментальная проверка решения задачи определения формы одновиткового соленоида для магнитно-импульсной сборки // Электротехника і електро-механіка. – 2009. – № 2. – С. 61-65.

Поступила 06.09.2010

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.  
 Национальный технический университет  
 "Харьковский политехнический институт"  
 кафедра "Электрические аппараты"  
 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21  
 тел. (057) 707-69-76, e-mail: baida@kpi.kharkov.ua

E.I. Bayda

#### Object deformation dynamics under magnetic-pulse treatment of material.

In the article, the dynamics of cylindrical tube deformation is considered under magnetic field action.

**Key words – magnetic-pulse treatment, electromagnetic force and pressure, deformation.**