

*Л.В.АВТОНОМОВА*, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
*С.В.БОНДАРЬ*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;  
*А.В.СТЕПУК*, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

У роботі виконаний кінцево-елементний аналіз електромагнітного штампування з урахуванням взаємозв'язку електромагнітних полів з механічним рухом тіла, що деформується. Моделювання перехідних процесів формування електромагнітного поля і структурний механічний аналіз виконувалися на пакеті ANSYS. Розглянуто складності при реалізації ітераційного процесу.

In the paper, a finite element analysis of electromagnetic forming is considered for the bound electromagnetic fields with the mechanical motion of a deformable body. Simulation of transient electromagnetic field during its formation and structure mechanical analysis performed on the package ANSYS. The complexity of the iterative modeling process implementation is considered.

В работе выполнен конечно-элементный анализа электромагнитной штамповки с учетом взаимосвязи электромагнитных полей с механическим движением деформируемого тела. Моделирование переходных процессов формирования электромагнитного поля и структурный механический анализ выполнялись на пакете ANSYS. Рассмотрены сложности при реализации итерационного процесса.

**1. Описание проблемы.** Алюминиевые и медные сплавы хорошо поддаются обработке в импульсных магнитных полях из-за их высокой проводимости и низких пределов текучести [1]. При численном анализе их деформирования взаимосвязь полей различной физической природы, как правило, не учитывается, хотя изменение геометрических размеров при пластическом деформировании оказывает влияние на распределение электромагнитного поля. Кроме того, на характер деформирования оказывает влияние и скорость деформации. При анализе полей электромагнитного и деформаций с учетом этих особенностей необходимо рассматривать связанную нелинейную модель.

**2. Постановка задачи и численная модель.** На рис. 1 показана деформируемая импульсным электромагнитным полем цилиндрическая алюминиевая заготовка (внутри) и стальная матрица. На рис. 2 приведены основные компоненты схемы установки для электромагнитной обработки, где R – выпрямитель, C – конденсаторы; G – искровой промежуток; L – катушки индуктора; F – заготовка.

При разряде конденсатора через катушку генерируется переменное магнитное поле, которое наводит вихревые токи в заготовке, вызывающие силы отталкивания между катушкой и заготовкой. Если возникающее механическое напряжение превышает предел текучести материала, то возникает высокоскоростная пластическая деформация. В свою очередь, изменение геометрии заготовки при деформировании влияет на индуктивность системы ка-

тушка-заготовка и, следовательно, частоту разряда конденсатора и амплитудно-временную зависимость генерируемого магнитного поля. Затухающий осциллирующий ток, протекающий в катушке, создает необходимое для деформирования электромагнитное поле, при этом распределение плотности тока в проводящих областях заготовки неравномерно вследствие скин-эффекта. Деформирование заготовки изменяет индуктивность системы и, соответственно, магнитное поле.

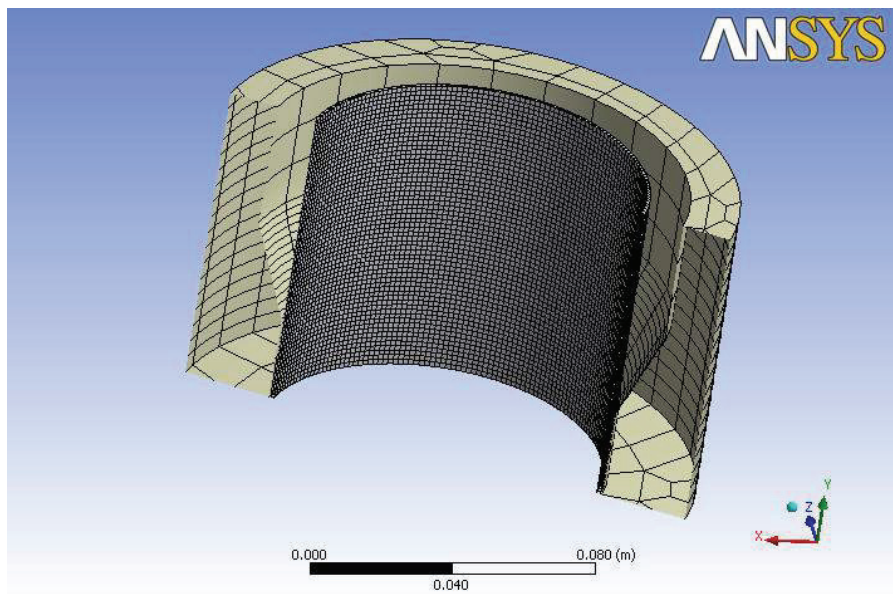


Рисунок 1 – Расчетная схема

Поскольку индукционные устройства и заготовки имеет осевую симметрию, то в дальнейшем используется цилиндрическая система координат. Азимутальная плотность тока в катушке, которая является источником электромагнитного поля зависит от времени и магнитного векторного потенциала

$$A(r, z, t): -\{\partial[(v/r) \cdot \partial(r \cdot A)/\partial r]/\partial t + \partial(v \cdot \partial A/\partial z)/\partial z\} + \sigma_e \cdot DA/Dt = J_{ex},$$

где  $\sigma_e = 1/\rho$  – электропроводность,  $v$  – скорость,  $DA/Dt = \partial A/\partial t - v \cdot \text{rot}A$  – полная производная, а  $J_{ex}$  – плотность наведенных токов.

Уравнение вектора магнитного потенциала решается итерационно по времени, причем шаг по времени оценивается исходя из периода затуханий колебательного контура (2-5 %). Вектор сил определяется также на каждом ременном шаге для последующего расчета процесса деформирования.

При электромагнитном воздействии происходит пластическая деформация обрабатываемого материала за короткий промежуток времени. Высокоскоростное пластическое деформирование описывается моделями вязкопла-

стичности. В частности, в [2] использовалась зависимость интенсивности напряжений  $\sigma$  от скорости деформирования .

$$\sigma = \sigma_0 [1 + (\varepsilon/\dot{\gamma})^m], \quad (1)$$

где интенсивность напряжений  $\sigma$  определяется функцией структурных свойств материала  $\Phi$  (размер зерен, кристаллическая решетка и проч.).

$$\Phi = [(\sigma/\sigma_0) - 1]^{1/m}, \quad (2)$$

где параметр  $m$  – степень структурной зависимости свойств материала.

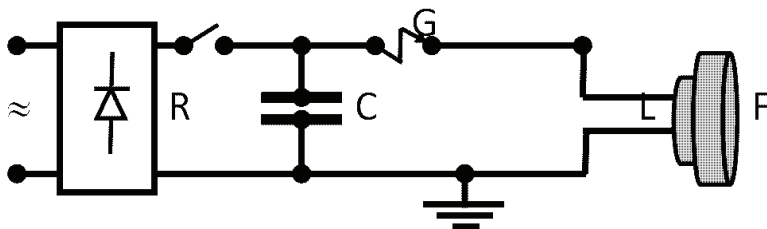


Рисунок 2 – Схема электромагнитно-импульсной установки

Основная сложность моделирования высокоскоростных электромагнитных процессов деформирования – это сочетание связности процессов различной физической природы с зависимостью их от времени. В настоящей работе использован метод расщепления с последующей стыковкой невязок расчета.

**3. Результаты моделирования.** Для численного решения поставленной задачи использовался программный комплекс ANSYS Multiphysics, позволяющий рассчитывать как механические, так и электромагнитные поля на основе метода конечного элемента [3].

В схеме расчета, изображенной на рис. 2, принимается, что катушка индуктора не деформируема, но свойства цепи (индуктивность) в общем случае зависят от времени из-за деформации заготовки.

При упрощенном анализе переходных электромагнитных процессов для недеформированной заготовки вычисляются возникающие в заготовке силы на каждом шаге по времени. Затем эти силы в качестве нагрузок переменных по времени переносятся в расчет структурных деформаций. В таком приближении не учитывается изменение силы из-за меняющегося зазора между индуктором и заготовкой, а, следовательно, и индуктивности системы. Силы, действующие на каждом временном шаге, вызывают локальные смещения, которые изменяют геометрию деформированной заготовки и задают начальные условия для расчета на следующем временном шаге. Кроме того, использование вязкопластической модели, описанной выше, дает возможность учета скоростных свойств деформирования заготовки.

Связанная задача решалась на основе пошагового расчета электромагнитной задачи с определением соответствующего напряженно-деформиро-

ванного состояния структурной системы заготовка- матрица с последующим пересчетом параметров электрической схемы соединения. Для каждого шага по времени, результат электромагнитного моделирования дает значения объемной плотности тока и соответствующую ей электромагнитную силу в каждом конечном элементе.

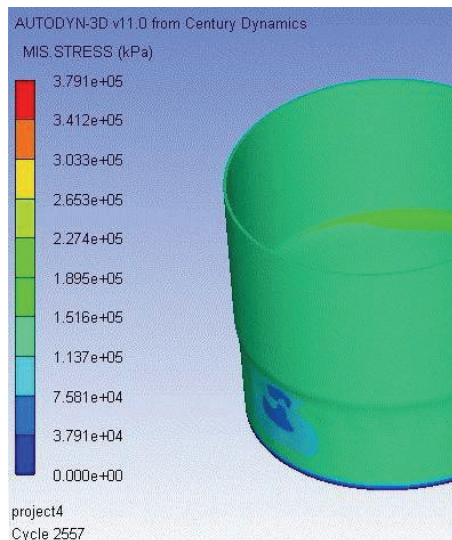


Рисунок 3 – Распределение поля напряжений в заготовке

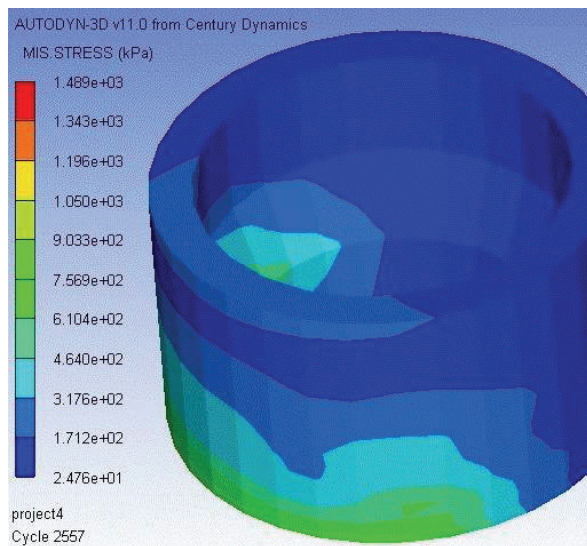


Рисунок 4 – Распределение поля напряжений в матрице

Конечноэлементная разбивка приведена на рис. 1. Триангуляция расчетной области для электромагнитного поля проводилась элементами CIRCU124.

На рис. 3 и рис. 4 показано напряжено- деформированное состояние алюминиевой заготовки и стальной матрицы после воздействия импульсного электромагнитного поля.

**Выводы.** Предложенная методика расчета связанной нестационарной электромагнитомеханической задачи позволяет учитывать переходные процессы и свойства материалов при обработке различных алюминиевых заготовок в импульсных электромагнитных полях. Решение связанной задачи с учетом влияния движения заготовки позволяет более точно определить изменение распределения электромагнитного поля, что позволяет более точно управлять распределением полей напряжений и деформаций в обрабатываемых заготовках. Даже если движение заготовки незначительно в отдельных случаях, такие расчеты позволяют предсказывать поведение всей системы при значительных импульсных токах в различных конфигурациях устройств, для различных материалов и размеров с целью оптимального проектирования устройств.

**Список литературы:** 1. *C. Flueraşu* Equivalent schemes of electromagnetic forming installations // Rev. Roum. Sci. Techn. Electrotechn. et Energ. – 1971. – 16, 4. – P. 593-609. 2. *Shiro Kobayashi, So-ik Oh, Taylan Altan* Metal forming and the finite element method. – New York: Oxford, Oxford University Press, 1989. 3. *R. Ernst, Pascale Gillon, V. Mallein, M. Garnier* FEM modeling of electromagnetic sheet metal forming // EPM 2003, Proceedings. – P. 301-306.

*Поступила в редколлегию 10.10.2011*

УДК 536.24

**Н.В.БАБКОВА**, аспирант, НТУ «ХПИ»;

**И.В.ГАЛУЩАК**, ст. преп., НТУ «ХПИ»;

**В.Я.ГОРБАТЕНКО**, канд. техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;

**А.М.НИКИТИН**, ст. преп., НТУ «ХПИ»

## **ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА В ОРЕБРЕННЫХ ТРУБАХ**

Надано результати розробки та тестової перевірки дискретної моделі процесу передачі тепла в елементах трубної поверхні теплообміну з зовнішнім розрізним спірално-стрічковим оребрением. Встановлена можливість моделювання, його інформативність та доступність за витратами матеріалів та часу.

Outcomes of development and test check of discrete model of the heat-transmission process in units with a tubular surface of heat exchange and with an external cutting spiral - tape ribbing represented. Possibility of simulation, his self descriptiveness and availability on the material and temporary expenditures is placed.