

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЕЛ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Д.В. Лавинский, к.т.н., доцент, НТУ «ХПИ»

Аннотация. Предложен подход к анализу электромагнитного поля и деформирования системы тел. Проведен анализ системы «заготовка – матрица» магнитно-импульсной обработки металлов.

Ключевые слова: деформирование, электромагнитное поле, векторный магнитный потенциал, электромагнитные силы, метод конечных элементов

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ДЕФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ТІЛ ПРИ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Д.В. Лавінський, к.т.н., доцент, НТУ «ХПИ»

Анотація. Запропоновано підхід до аналізу електромагнітного поля та деформування системи тіл. Проведено аналіз системи „заготовка – матриця” магнітно-імпульсної обробки металів.

Ключевые слова: деформування, електромагнітне поле, векторний магнітний потенціал, електромагнітні сили, метод скінчених елементів..

THE MODELING AND THE ANALYSIS OF BODY SYSTEM DEFORMATION UNDER THE ELECTROMAGNETIC FIELD ACTION

D.V. Lavinsky, Ph.D., NTU «KhPI»

Annotation. The technique of analysis of the electromagnetic field and deformation of a system of interacting bodies is presented. The analysis of the "blank - matrix" system was made.

Keywords: deformation, electromagnetic field, vector magnetic potential, electromagnetic force, finite element method.

Введение

Электромагнитное поле (ЭМП) является неотъемлемым условием работы для множества элементов конструкций и машин. Сюда следует отнести элементы энергетического оборудования, системы преобразования энергии (трансформаторы, генераторы), устройства, предназначенные для защиты от молний, технологические системы магнитно-импульсной обработки материалов (МИОМ) и т.д. Высокоинтенсивные ЭМП приводят к возникновению значительных уровней энергии в проводящих телах, что может приво-

дить к их разрушению. Данный факт делает актуальным создание методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС) электропроводных тел для дальнейшей оценки прочности.

Методы анализа НДС должны базироваться на предварительном определении распределения компонент ЭМП. Также необходимо учитывать условия контактного взаимодействия элементов конструкций, особенности геометрии и связанность процессов деформирования и распространения ЭМП.

Анализ состояния проблемы

Методы анализа деформирования электропроводных тел под действием ЭМП должны базироваться на соответствующих моделях термомеханики сплошной среды. Теоретические основы, описывающие модели механики сплошной среды, которые учитывают действие полей разной физической природы (включая электромагнитную) представлены в классических фундаментальных работах Амбарцумяна, Эрингена, Ильющина, Новацко-го, Подстригача, Седова, Можена, Трасдела, Топина и др. В рамках этих моделей, внешнее ЭМП воздействует на термомеханическое состояние тела, в уравнениях равновесия учитываются слагаемые, которые характеризуют действие поля на тело, а именно, электромагнитные силы и электромагнитные моменты, а также источники энергии, которые появляются в процессе воздействия электромагнитного поля на тело. Представленные модели базируются на уравнениях Максвелла, описывающие характер ЭМП, в вакууме, и в движущемся деформированном теле в соответствии с учетом его электромагнитных свойств. Отметим, что большая часть аналитических и полуаналитических методов анализа связанного деформирования электропроводных тел имеет ограниченную сферу применения, так как они разработаны для тел канонической формы. Альтернативой здесь становится применение численных методов анализа, среди которых наиболее распространенным в данное время является метод конечных элементов МКЭ.

Постановка задачи

В работе [1] представлена общая постановка задачи анализа упруго-пластического деформирования системы электропроводных тел при действии импульсного ЭМП. Численный метод решения на основе МКЭ возможен, например, путем введения векторного магнитного потенциала [2]:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \quad (1)$$

где \vec{B} – вектор магнитной индукции, \vec{A} – векторный магнитный потенциал. Тогда задача анализа связанного деформирования при действии ЭМП в общем виде выглядит так:

$$\begin{cases} [M] \{A\} = 0; \\ [K] \{u\} = \{F_{em}\}; \\ \{F_{em}\} = -[K_m] \{A\}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $[M]$ – матрица, зависящая от «электромагнитных свойств материала», $\{A\}$ – вектор-столбец магнитного потенциала, $[K]$ – матрица жесткости, $\{u\}$ – вектор-столбец перемещений, $\{F_{em}\}$ – вектор-столбец электромагнитных сил, $[K_m] = \frac{1}{2} \{A\}^T \frac{\partial [M]}{\partial \{u\}}$ – матрица,

учитывающая влияние изменения механического состояния на «электромагнитные свойства материала». Сведение первоначально связанной задачи к системе формально независимых уравнений (2) позволяет на этапе численного решения независимо рассматривать распределение ЭМП и деформирование. Далее применим предложенный метод к совместному анализу системы «заготовка – индуктор» технологической операции МИОМ. Рассмотрим индуктор (И), который используется для деформирования тонкостенных заготовок [3] – рис.1.



Рис. 1. Общий вид индуктора с коническим рабочим окном

Анализ деформирования системы «индуктор – заготовка»

Решение было проведено для расчетной схемы, представленной на рис. 2, в осесимметричной постановке. Принимались следующие геометрические параметры системы: внешний диаметр И – 100 мм; толщина И – 15 мм; угол наклона конической поверхности – 60° ; толщина заготовки – 2 мм; наименьшее расстояние между И и заготовкой – 2 мм; диаметр заготовки в полтора раза больше, чем диаметр И (это оправдано тем, что подобный И должен использоваться для удаления вмятин на корпусах транспортных средств). Для более точного анализа распределения компонентов ЭМП была создана конечно-элементная модель, объединяющая И, заготовку и окружающую их воздушную среду. Размеры окружающей воздушной среды выбирались из соображений затухания ЭМП на удалении от его источника. Для

оценки этого процесса был проведен ряд расчетов, которые показали, что в радиальном направлении достаточно отдалить границу области Γ_3 на расстояние порядка трех толщин заготовки от ее торца (граница Γ_1). В направлении оси z достаточно отдалить границу Γ_3 на расстояние порядка восьми толщин заготовки. Физико-механические свойства элементов расчетной схемы принимались следующими: И – материал медь: относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1$, модуль упругости – 180 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.33, предел текучести порядка 200 – 210 МПа; заготовка – материал сталь: относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1.3$, модуль упругости – 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.28, предел текучести порядка 250 – 280 МПа; воздух: относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1$. Задача решалась в квазистационарной постановке, источником поля рассматривался ток, равномерно распределенный по линии Γ_2 ($I_m = 50(\text{кА})$). Возможность сведения импульсного процесса «электромагнитного нагружения» к анализу распределения компонент НДС в квазистационарной постановке обоснована в классической работе [4]. В монографиях [5,6] имеется обоснование подобного подхода для большого класса технологических операций МИОМ. В работах [7,8] проведен анализ пространственно-временного распределения компонент ЭМП и НДС для упрощенной расчетной модели И. В частности показано, что максимальные значения компоненты НДС в заготовке достигают в момент времени, соответствующий первому максимуму ЭМП. Т.к., целью технологической операции является появление пластических деформаций в материале заготовки, то подбор соответствующих параметров внешнего воздействия может привести к появлению подобных деформаций в момент времени, соответствующий первому максимуму ЭМП. Т.о. применение квазистационарного приближения является оправданным.

Расчетная схема дискретизировалась четырехузловыми осесимметричными конечными элементами с билинейной аппроксимацией азимутальной компоненты векторного магнитного потенциала и перемещений. На границе Γ_3 было задано условие затухания ЭМП: равенство нулю азимутальной компоненты векторного магнитного потенциала. На границе Γ_1 были заданы условия закрепления И и заготовки. В данном случае в узлах, принадлежащих указанной границе, принимались

нулевые значения радиальных и меридиональных перемещений. Если для И такое условие является максимально приближенным к реальности, то выбранные размеры заготовки практически исключили влияние краевого эффекта на распределение компонент НДС в окрестности рабочей области, а выбор подобного граничного условия делает более устойчивым процесс решения.

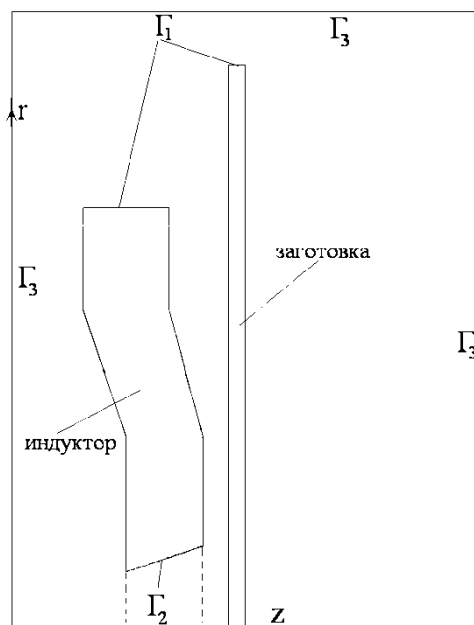


Рис. 2. Расчетная схема индуктора и заготовки совместно с воздушной средой

На первом этапе решения были получены пространственные распределения компонент ЭМП. Мы не будем останавливаться на их анализе. Далее анализировалось распределение полей напряжений и деформаций. На рис.3 представлено деформированное состояние И и заготовки.

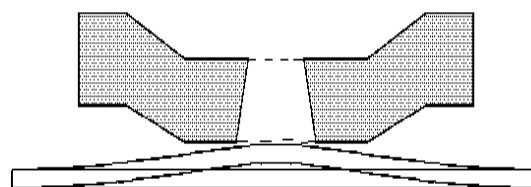


Рис.3. Деформированное состояние индуктора и заготовки

Видно, что заготовка деформируется в гораздо большей степени, чем И. Это объясняется конструктивными особенностями: И более массивное тело. Анализ перемещений точек, принадлежащих И, свидетельствует, что их значения не велики, т.е. в процессе работы форма И практически не искажается, и, соот-

ветственно, создаваемое ЭМП будет иметь стабильную пространственную конфигурацию. Максимальные перемещения заготовки наблюдаются непосредственно напротив конического окна И.

На рис. 4 представлено распределение интенсивности напряжений. Видно, что максимальные значения интенсивности напряжений, как в И, так и в заготовке наблюдаются в окрестности конического окна, т.е. в непосредственной близости от источника поля. Можно прогнозировать, что применение подобного типа И для выправления дефектов будет оправдано, т.к. наибольшие напряжения действительно возникают в непосредственной близости от рабочей зоны.



Рис.4. Распределение интенсивности напряжений в индукторе и заготовке

Максимальная интенсивность напряжений в заготовке превышает предел текучести материала, т.е. при данной величине внешнего воздействия заготовка будет деформироваться пластически. Но, и в И максимальные значения интенсивности напряжений также превышают предел текучести, что может отрицательно сказаться на его работоспособности.

Для ликвидации данного явления необходимо применять особые конструктивные решения, одним из которых может быть использование бандажей из непроводящих материалов. Бандажи, присоединенные с натягом, создадут предварительное напряженное состояние, которое, при наложении рабочих напряжений понизит их.

Выводы

Представлен общий подход к анализу распределения ЭМП и деформирования систем электропроводных тел при действии ЭМП. Для одного типа индукторов получены распределения компонент напряженно-деформированного состояния для единой расчетной схемы «индуктор – заготовка».

Литература

1. Лавінський Д.В. Задачі пружно-пластичного деформування тіл при магнітно-імпульсному навантаженні / Лавінський Д.В. // *Машинознавство* № 7-8 (169-170). – Львів: „КІНПАТРІ ЛТД”, 2011.– С.48-51.
2. Тозони О.В., Расчет трехмерных электромагнитных полей / Тозони О.В., Маергойз И.Д. – «Техніка», 1974. – 352 с.
3. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Т. 3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография / Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
4. Вольмир А.С. Задачи магнитоупругости в теории оболочек / Вольмир А.С. – Сб. «Расчеты на прочность». – М.: Машиностроение, 1975, вып. 16. – С. 261-279.
5. Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. – Харьков: НТУ «ХПИ», -2001.– 272 с.
6. Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. – Харьков: МОСТ-Горнадо, 2003.– 288 с.
7. Лавинский Д.В. Колебания круглой пластины в переменном магнитном поле / Лавинский Д.В. // *Матем. мет. в техн. и технологиях – ММТТ-25: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 3. Секции 5 / под общ. ред. А.А.Большакова. – Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012; Харьков: Национ.техн. ун-т «ХПИ», 2012. – 184с. – С. 58 – 59.*
8. Oleg K. Morachkovsky Nonlinear dynamics of a thin plate in a nonstationary electromagnetic field of the inductor / Oleg K. Morachkovsky, Denis V. Lavinsky // *Нелінійна динаміка / Тезиси доповідей 4-ої міжнародної конференції (19-22 червня, 2013р., Севастополь). – Х.: Вид-во «Точка», 2013. – С. 299-304.*