

Д.В.ЛАВИНСКИЙ, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОПЕРАЦИИ «ЗАПОЛНЕНИЯ УГЛОВ», ЧАСТЬ 2

У роботі запропоновано математичну постановку задачі пружного-пластичного деформування системи контактної взаємодіючих тіл при магнітно-імпульсному навантаженні. Рівняння стану визначено за законами пластичної течії. Розв'язано, як приклад, задачу пружно-пластичного деформування кутової заготовки при дії плоскої системи сил імпульсного магнітного поля. Одержані величини зовнішнього тиску та зроблені загальні рекомендації для проведення подібних технологічних операцій.

Mathematical problem statement of system elastic-plastic deformation of interacting solids involving pulse-magnetic loading has proposed in this article. State equations accepted correspondingly plastic yielding theory. The problem of elastic-plastic deformation of corner preform by plane force system of pulse magnetic field has solved. The technological operations for curve correction were investigated. The general recommendations for carrying out of similar technological operations have made and data of external pressure by which conditions of the technological operation achieved have obtained.

В работе предложена математическая постановка задачи упруго-пластического деформирования системы контактно взаимодействующих тел при магнитно-импульсной нагрузке. Уравнение состояния определено по законам пластического течения. В качестве примера решена задача упруго-пластического деформирования угловой заготовки при действии плоской системы сил импульсного магнитного поля. Получены величины внешнего давления и сделаны общие рекомендации для проведения подобных технологических операций.

Актуальность проблемы. В настоящее время процессы обработки, основанные на способности материалов пластически деформироваться находят все более широкое применение. Помимо традиционных методов обработки металлов давлением (ОМД) развивается магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) [1]. При разработке операции МИОМ приходится решать задачи магнито-упруго-пластичности. Следует отметить, что многие отечественные и иностранные ученые в разное время уделяли внимание проблемам анализа термомеханики при наличии электромагнитного поля. Существенный вклад сделан С.А. Амбрацумяном, Я.И. Бураком, А.С. Вольмиром, О.М. Гузем и другими. Но преимущественно подобные исследования направлены на анализ упругого поведения материала, а решения, обычно, приводятся для тел канонической формы. Таким образом, проблема создания эффективных методов расчета магнитно-упруго-пластичности для тел произвольной формы в настоящее время является достаточно актуальной.

Постановка задачи. Процессы, протекающие при упруго-пластическом деформировании составных тел при наличии электромагнитного поля могут быть описаны следующей системой уравнений:

– фундаментальные уравнения Максвелла [1]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \varepsilon_c \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}; & \operatorname{rot} \vec{E} &= -\mu_c \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \vec{H} &= 0; & \operatorname{div} \vec{E} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{j} , \vec{E} , \vec{H} – плотность тока, напряженности электрического и магнитного полей; μ_c , ε_c – магнитная и электрическая проницаемость.

– физические соотношения :

$$\vec{D} = \varepsilon_c \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu_c \vec{H}; \quad \vec{j} = \gamma_c \vec{E} + \gamma_c \left[\vec{u} \times \vec{B} \right], \quad (2)$$

где \vec{D} , \vec{B} – векторы индукции электрического магнитного полей; γ_c – удельная электропроводность материала.

– уравнения равновесия:

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0; \quad x_1, x_2, x_3 \in V, \quad (3)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, f_i – компоненты вектора объемных пондеромоторных сил Лоренца, вектор которых подсчитывается по формуле: $\vec{F}_b(x_i) = \mu_c [\vec{j} \times \vec{H}]$.

– геометрические соотношения:

$$\varepsilon_{ij} = 1/2 (u_{j,i} + u_{i,j}), \quad (4)$$

– условия на поверхности:

$$\sigma_{ij} n_j = p_m; \quad \forall x \in S_p, \quad (5)$$

– условия механического контактного взаимодействия:

$$u_n^{m-1} + u_n^{m+1} - \delta_{on}^m \leq 0, \quad \sigma_{nn}^m \leq 0, \quad (6)$$

– условия фрикционного взаимодействия:

$$|\sigma_{nt}| = f_{mn} \sigma_{nn}, \quad (7)$$

где f_{mn} – коэффициент трения скольжения, зависящий от материалов взаимодействующих тел.

– уравнения состояния в форме пластического течения Прандтля-Рейса [2] для приращений пластических деформаций:

$$d(\varepsilon_{ij})_p = \frac{1}{2G} \left[d\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{3\nu}{1+\nu} d\sigma_0 \right] + \frac{1}{\sigma_i} \sqrt{\frac{3}{2} d(\varepsilon_{ij})_p d(\varepsilon_{ij})_p} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0), \quad (8)$$

где $\sigma_0 = 1/3 \sigma_{kl} \delta_{kl}$; $\varepsilon_0 = 1/3 \varepsilon_{kl} \delta_{kl}$ – средние напряжения и деформации.

– условие пластичности:

$$\frac{3}{2} \left[s_{ij} - \frac{2}{3} \frac{EE_T}{E - E_T} (\varepsilon_{ij})_p \right] \times \left[s_{ij} - \frac{2}{3} \frac{EE_T}{E - E_T} (\varepsilon_{ij})_p \right] - \sigma_T^2 = 0, \quad (9)$$

где s_{ij} – девиатор напряжений; E_T – модуль упрочнения.

Для тел сложной геометрии при разнообразных способах нагружения и

закрепления наиболее эффективным является использование численных методов. Одним из наиболее работоспособных является метод конечных элементов (МКЭ).

Пример расчета. Отдельный класс технологических операций направлен на получение изделий из тонких листовых заготовок путем сгибания. Практика показывает, что в результате сгибания в зонах углов появляются скругления, размеры которых являются недопустимыми с точки зрения технологии. Задача исправления подобных скруглений в практике обработки материалов известна как задача «заполнения углов» [3]. Ключевым моментом при создании технологической операции является разработка схемы приложения давления непосредственно в угловой зоне. В работе [4] обсуждался вопрос использования магнитно-импульсного воздействия на заготовку с целью «заполнения угла». Было показано, что возможно получить давление, равнодействующая которого направлена по биссектрисе угла, причем воздействие происходит только в угловой зоне. Также было выяснено, что проведение такой технологической операции невозможно без использования матрицы, которая помогает сохранить прямолинейные стороны угла. Кроме того, использование матрицы позволяет не закреплять заготовку, так как в зонах закрепления возникают уровни интенсивности напряжений сопоставимые с уровнями, которые наблюдаются в зоне скругления.

Для того, чтобы исключить влияние матрицы на электромагнитное состояние заготовки, она должна выполняться из непроводящих материалов (например из стеклотекстолита). Жесткость матрицы должна быть значительно выше, чем у заготовки. В данном случае это может быть достигнуто, если выполнять матрицу значительно массивнее по сравнению с заготовкой. Исследования показали, что при толщине стеклотекстолитовой матрицы в 50 раз большей чем толщина стальной заготовки, матрица практически не деформируется. Теперь рассмотрим процесс деформирования с целью определения величины внешнего давления, при котором в заготовке будут наблюдаться пластические деформации.

Пусть необходимо исправить скругление, возникшее в результате изгиба на угол $\pi/2$ тонкой листовой заготовки. Будем считать, что заготовка является достаточно протяженной вдоль ребра угла по сравнению со сторонами угла. В силу того, что давление прикладывается в плоскости, которая перпендикулярна к ребру угла, и что вдоль этого ребра давление постоянно, задача может рассматриваться в рамках плоской деформации. Для построения конечно-элементной модели использовался плоский восьми узловый конечный элемент с квадратичной аппроксимацией перемещений. Материал заготовки: сталь Ст10 (модуль упругости $E = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,27$, предел текучести $\sigma_T = 220$ МПа, касательный модуль $E_K = 20$ ГПа, предел прочности $\sigma_B = 520$ МПа). Матрица принималась выполненной из условного материала (модуль упругости $E = 400$ ГПа, коэффициент Пуассона

$\nu = 0,1$). Такие механические характеристики обеспечили поведение заготовки как недеформируемого тела. Геометрические размеры заготовки были приняты следующими: радиус первоначального скругления 4 мм, толщина 2 мм, длина стороны угла 10 мм. Для матрицы были приняты следующие размеры: толщина 20 мм, длина стороны угла 10 мм. Внешние стороны матрицы рассматривались жестко закрепленными: $u_x = u_y = 0$. Заготовка рассматривалась незакрепленной, свободно лежащей на матрице в условиях одностороннего контакта. Для адекватного отражения процессов контактного деформирования использовался метод введения слоя контактных конечных элементов (ККЭ) [5]. В данном случае ККЭ с точки зрения геометрического представления выбирались такими же как и базовые КЭ, но свойства материала задавались так, чтобы ККЭ «сопротивлялись» сжатию и «не сопротивлялись» растяжению. Кроме этого, сдвиговая жесткость материала ККЭ задавалась в соответствии с законом (7) для коэффициента трения 0,2. Вначале был произведен расчет, когда внешнее давление прикладывалось непосредственно в области скругления. Оказалось, что в этом случае стороны заготовки отходят от соответствующих поверхностей матрицы. Данное обстоятельство может привести к искажению формы обрабатываемой заготовки. Далее рассмотрим результаты деформирования с целью определения величины давления в угловой зоне. Оказалось, что явление возникновения пластических деформаций в материале заготовки наблюдаются при величине давления более 30 МПа. На рис. 1 приведено распределение интенсивности напряжений в заготовке, когда величина давления в угловой области составляет 100 МПа.

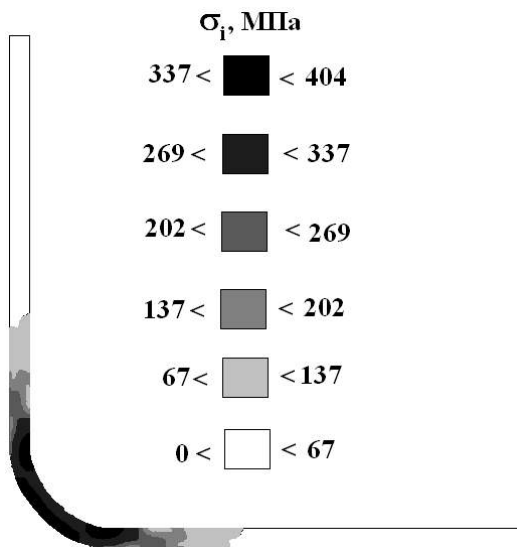


Рисунок 1

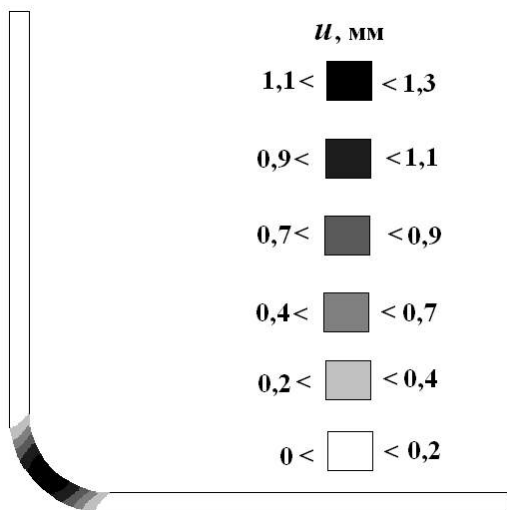


Рисунок 2

Как видно из рисунка вся область скругления находится в пластическом состоянии, максимальные значения интенсивности составляют около 400 МПа, Для данного материала подобное значение является близким к пределу прочности, то есть прикладываемая внешняя нагрузка близка к критической, дальнейшее увеличение внешнего давления может привести к разрушению материала. На рис.2 приведена картина распределения результирующих перемещений заготовки. Как видно из рисунка перемещения отличны от нулевых непосредственно в области скругления, а их величины достаточно значительны. Следует отметить, что для подобных технологических операций довольно проблематично сформулировать общие требования и условия, которые бы однозначно определяли количественную картину деформирования, так как многое зависит от характеристик материала и размеров заготовки.

Выводы. Представлена общая постановка задачи упруго-пластического деформирования при наличии электромагнитного поля. Уравнения состояния при пластическом деформировании материала приняты в соответствии с теорией пластического течения. Для одного случая магнитно-импульсной обработки металлов проведен анализ упруго-пластического деформирования заготовки. Задача решалась по схеме метода конечных элементов. Сформулированы общие рекомендации к разработке подобных технологических операций.

Список литературы: 1. *Maxwell J.C.* A Treatise on Electricity and Magnetism / In 2 vol.: Vol. II. / *Maxwell J.C.* – Oxford: Clarendon Press, 1873. – XXIV. – 445 p. 2. *Зубчанинов В.Г.* Основы теории упругости и пластичности: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / *Зубчанинов В.Г.* – М.: Высшая

школа, 1990. – 368 с. **3.** *Белый И.В.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / *Белый И.В., Фертник С.М., Хищенко Л.Т.* – Х.: Вища школа, 1977. – 189 с. **4.** *Бондарь С.В.* Определение магнитного давления в углах при деформировании листовых заготовок / *Бондарь С.В., Лавинской Д.В.* // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП», 2009. – № 42 – С. 11-14. **5.** *Лавинский Д.В.* Анализ упруго-пластического деформирования при моделировании операции «заполнения углов». Часть 1 / *Лавинский Д.В.* // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП». – 2010. – № 37. – С. 100 – 104.

Поступила в редколлегию 20.10.2011