

происходит термическое и химико-термическое разупрочнение волокон.

Предлагаемый метод исключает эти недостатки импульсных методов компактирования, так как предлагает разогрев вплоть до оплавления матрицы в приконтактной зоне волокна с матрицей в течение 2-3 с за счет высокого электросопротивления этих зон проходящему через заготовку импульсу тока, во-вторых, синхронному с ним импульсному компактированию достаточно размягченной в этот момент матрицы. При этом достигаются высокая плотность материала, достаточная прочность границы раздела и сохраняются исходная прочность и целостность армирующих волокон.

В распоряжении лаборатории имеется установка магнитно-импульсного прессования в 30 кДж. На имеющейся установке моделируется процесс импульсного компактирования с импульсным разогревом заготовки проходящим током, для чего осуществлена ее модернизация.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

Хименко Л.Т., Александров А.В., Горкин Л.Д., Легеза А.В.

*Харьковский государственный политехнический университет.
310002, Харьков, ул.Фрунзе, 21*

АННОТАЦИЯ. В настоящей работе рассматриваются вопросы оптимизации индукторных систем для деформирования тонкостенных трубчатых заготовок.

Используемая модель деформирования заготовки основана на том, что в рассматриваемых операциях толщина заготовки значительно меньше ее радиуса, а также геометрических размеров образуемых ею зигов. В модели рассмотрены упругопластические деформации заготовки под действием импульсного магнитного поля и сил, возникающих при ее контакте с оправкой. Для определения этих деформаций на сечение индуктора, заготовки и оправки на

носились расчетная сетка, состоящая из элементарных витков, как это показано на рис.1.

Изменения геометрии заготовки определялось через перемещение центральных точек элементарных витков под действием результирующей силы, действующей на каждый элементарный виток.

$$\bar{F}_i = \bar{F}_{mi} + \bar{F}_{i+1} + \bar{F}_{i-1} + \bar{F}_{\varphi i} + \bar{F}_{poi} , \quad (1)$$

где \bar{F}_{mi} - сила давления магнитного поля; \bar{F}_{i+1} и \bar{F}_{i-1} - силы, вызванные напряжениями в материале заготовки, действующих со стороны $i+1$ -го и $i-1$ -го элементарных витков; $\bar{F}_{\varphi i}$ - сила, обусловленная радиальной деформацией i -го витка; \bar{F}_{poi} - сила, возникающая при взаимодействии витка с поверхностью оправки.

Сила, действующая со стороны соседних элементарных витков, равна:

$$\bar{F}_{i+1} = \bar{\sigma}_{r,i+1} \cdot 2\pi r_i \cdot d_3 , \quad (2)$$

где $\bar{\sigma}_{r,i+1}$ - напряжение в металле между серединами i -го и $i+1$ -го элементарных витков; r_i - радиус i -го элементарного витка; d_3 - толщина заготовки в рассматриваемой точке.

Напряжения в заготовке определялись на основе упругопластической модели деформирования металла с учетом эффекта Баушингера (рис. 2) и зависимости упругопластических свойств металла от скорости деформирования. Были использованы справочные данные, приведенные в [1].

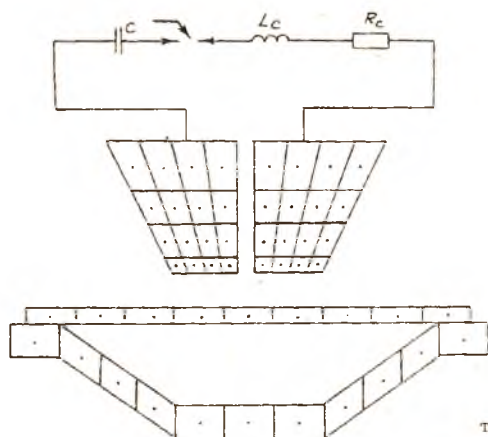


Рис.1. Расчетная схема системы "индуктор-заготовка"

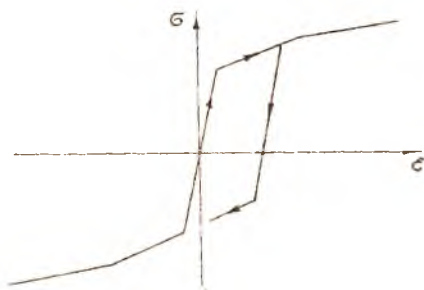


Рис.2. Модель деформирования металла заготовки

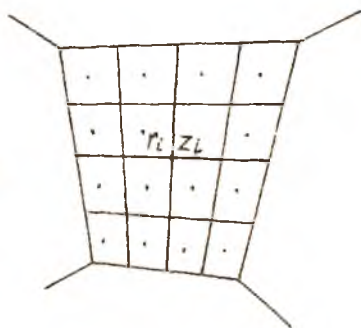


Рис.3. Подразбивка элементарного витка

Сила $\vec{F}_{\varphi l}$ равна по величине

$$\vec{F}_{\varphi l} = \vec{\sigma}_{\varphi l} \cdot S_l, \quad (3)$$

где $\vec{\sigma}_{\varphi l}$ - азимутальные напряжения в витке; S_l - площадь его поперечного сечения. Эта сила направлена вдоль радиуса заготовки.

В рассматриваемых операциях оправка принималась жесткой, т.к. ее прочность значительно превышает прочность заготовки. Сила \vec{F}_{poi} включает две составляющие: силу реакции опоры и силу трения скольжения заготовки по оправке. Сила реакции опоры численно равна силе давления на нее элементарного витка F_g и противоположна ей по направлению. А сила трения равна $\vec{F}_g \mu_{\text{mp}}$, где μ_{mp} — коэффициент трения скольжения материалов заготовки и оправки. Она направлена встречно движению заготовки.

На каждом шаге для каждого элементарного витка вычислялась результирующая сила \vec{F}_i с учетом деформаций, полученных на предыдущем временном шаге. Далее рассчитывались перемещения элементарных витков и новые напряжения в заготовке.

Данная формулировка позволяет рассматривать процессы в заготовках как со свободными, так и с закрепленными краями. В первом случае к крайним виткам заготовки применяются общие формулы, во втором — их координаты жестко фиксируются.

Для симметричных заготовок достаточно рассматривать только один квадрант их сечения. В этом случае для расчетов деформаций достаточно зафиксировать осевую координату среднего элементарного витка, учитывая, что осевая составляющая действующей на него силы равна нулю.

Расчетная схема для определения электромагнитных процессов, приведенная на рис.1, состоит из разрядного контура МИУ и системы “индуктор - заготовка”, разделенной на w_m элементарных витков.

На каждом временном шаге для каждого элементарного витка вычислялся протекающий в нем ток i_k , а также распределение магнитного поля в его сечении. Затем определялась действующая на него сила давления магнитного поля \vec{F}_m .

Система уравнений для токов в элементарных витках, тока индуктора $i_{\text{инд}}$, а также напряжений на витках индуктора U_i имеет вид:

$$\sum_{k, k \neq l}^{w_{\Sigma}} M_{kl} \frac{\partial i_l}{\partial t} + L_l \frac{\partial i_l}{\partial t} + R_l i_l = U_l; l = 1, 2, \dots, w_{\Sigma};$$

$$\sum_{k=1}^{w_1} i_k = \sum_{k=w_1+1}^{w_1+w_2} i_k = \dots = \sum_{k=w_1+w_2+1}^{w_1+w_2+w_3} i_k = i_{\text{инд}};$$

$$L_c \frac{\partial i_{\text{инд}}}{\partial t} + R_c i_{\text{инд}} + \frac{1}{c} \int_{t_0}^t i_{\text{инд}} dt + \sum_j^n U_o, \quad (4)$$

где L_c, R_c, c - собственные параметры МИУ; U_o - напряжение на емкостном накопителе; w_l - количество элементарных витков в l -ом витке индуктора; w_u - количество элементарных витков в индукторе; w_{Σ} - общее количество элементарных витков в схеме; M_{kl} - взаимная индуктивность двух элементарных витков; L_l, R_l - индуктивность и активное сопротивление l -го элементарного витка; n - количество витков индуктора.

Взаимная индуктивность двух элементарных витков может быть вычислена через векторный потенциал магнитного поля

$$M_{kl} = \frac{2\pi r_k A_{kl}}{i_l}, \quad (5)$$

где A_{kl} - векторный потенциал в точке k -го элементарного витка, создаваемый током i_l , протекающим в l -ом элементарном витке; r_k - радиус k -го витка.

В осесимметричном соленоиде, все витки которого лежат в параллельных плоскостях, векторный потенциал магнитного поля имеет только одну составляющую A_{φ} , распределение которой описывается уравнением:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial r} \right) - \frac{A_{\varphi}}{r^2} + \frac{\partial^2 A_{\varphi}}{\partial z^2} = -\mu_0 j, \quad (6)$$

где j - плотность тока в соленоиде.

Уравнение (6) решалось методом интегрального преобразования Фурье [2]. В результате векторный потенциал A_{φ} равен

$$A_{kl} = \frac{\mu_0 r_l i_l}{\pi} \int_0^{\infty} I_1(\alpha r_l) K_1(\alpha r_k) \cos(\alpha(z_k - z_l)) d\alpha, \quad (7)$$

где $I_1(\alpha r_1)$ и $K_1(\alpha r_k)$ — функции Бесселя мнимого аргумента первого и второго рода.

Интеграл, содержащийся в этом выражении, имеет аналитическое решение, которое приведено в [3]:

$$\int_0^{\infty} K_\nu(ax) I_\nu(bx) \cos(cx) dx = \frac{1}{2\sqrt{ab}} \frac{\Gamma(\nu+1)\Gamma(\frac{1}{2})}{2^{\nu+1}\Gamma(\nu+\frac{3}{2})} \left(\frac{a^2+b^2+c^2}{2ab} \right)^{-\nu-1/2} \times \\ \times F\left(\frac{5}{4}, \frac{3}{4}, \frac{7}{4}; \left(\frac{2ab}{a^2+b^2+c^2}\right)^2\right); \quad (8)$$

$\Gamma(x)$ — Гамма-функция, а $F(\alpha, \beta, \gamma, y)$ — гипергеометрический ряд.

Подставляя (8) в (7), можно получить окончательное выражение для векторного потенциала:

$$A_{kl} = \frac{\mu_0 i_l}{8\sqrt{2}} \sqrt{\frac{r_l}{r_k}} \beta^{-1.5} F\left(\frac{5}{4}, \frac{3}{4}, \frac{7}{4}; \frac{1}{\beta^2}\right); \\ \beta = \frac{r_l^2 + r_k^2 + (z_k - z_l)^2}{2r_l r_k}. \quad (9)$$

Определить значение индуктивности элементарного витка L_l по формулам (5) - (9) невозможно, т.к. векторный потенциал, создаваемый элементарным витком непосредственно в его точке, равен бесконечности. Для его нахождения можно воспользоваться формулами для индуктивности витка прямоугольного сечения, приведенными в [4], однако авторы из соображений простоты численной реализации применяли дополнительную подразбивку элементарного витка на подвитки, как это показано на рис.3. При этом индуктивность L_l вычислялась через векторный потенциал в точке элементарного витка A_u , создаваемый токами в подвитках, которые равны между собой и в сумме составляют ток элементарного витка.

$$L_l = \frac{2\pi_l A_u}{i_l}. \quad (10)$$

При известных токах в элементарных витках вычислялись силы \vec{F}_{mi} , действующие на них

$$\vec{F}_{mi} = 2\pi r_i \cdot \vec{i}_i \times \vec{B}_i, \quad (11)$$

где \vec{B}_i - средняя индукция магнитного поля в сечении i -го элементарного витка, которая может быть вычислена через векторный потенциал:

$$\begin{aligned} B_z &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\varphi); \\ B_r &= -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}, \end{aligned} \quad (12)$$

где B_r и B_z - компоненты вектора \vec{B} .

Описанная выше методика была применена при проектировании индукторной системы для заготовки трубы из сплава АМГ с толщиной стенки 1,5мм и диаметром 350мм на установке МИУ - 50 ХПИ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. - М.: Металлургия, 1976-487с.
2. Смайт В. Электростатика и электродинамика. - М.: Изд-во иностран. лит., 1954.- 604с.
3. Градштейн И.О., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. - 1097с.
4. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. - Л.: Энергоиздат, 1986-188с.