

Научная статья  
УДК 621.98.044.7:621.757.002  
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183585>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/LMOCAM>



## Изготовление патрубка с жалюзи системы кондиционирования воздуха ЛА методом раздачи давлением импульсного магнитного поля

Мохамед Шериф Эль Сайед Ахмед Солиман<sup>1</sup>, Николай Васильевич Курлаев<sup>2</sup>✉,  
Сергей Владимирович Шайдунов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),  
Новосибирск, Российская Федерация

<sup>1</sup> [axmed\\_soliman@corp.nstu.ru](mailto:axmed_soliman@corp.nstu.ru)

<sup>2</sup> [kurlaev@corp.nstu.ru](mailto:kurlaev@corp.nstu.ru)✉

<sup>3</sup> [shajdurov@corp.nstu.ru](mailto:shajdurov@corp.nstu.ru)

**Аннотация.** Раздача труб импульсным магнитным полем — это метод, который представляет собой твердотельное формование трубчатых деталей. В настоящем исследовании трубчатая деталь летательного аппарата (ЛА) — алюминиевый патрубок с жалюзи — изготавливается методом раздачи магнитно-импульсным давлением, равномерным по периметру трубы. В качестве материала для заготовки использовался алюминиевый сплав Д16Т. Было осуществлено численное моделирование для определения параметров раздачи без разрушений детали, а затем были проведены эксперименты с такими же параметрами. Результаты, полученные в процессе моделирования, показали, что для успешной раздачи необходимо поддерживать требуемое значение давления электромагнитного поля и зазора между формирующей катушкой и основной трубой. Электрическое напряжение, полученное при моделировании, и первый пик напряжения на катушке, измеренный в эксперименте, сравнивались. Было решено использовать комбинацию аналитического и вычислительного подходов для вычисления электрического напряжения, необходимого для раздачи трубы. Разработана упрощенная аналитическая структура для оценки эквивалентных напряжений в алюминиевом сплаве Д16Т при приложенном давлении магнитного поля. Результаты, полученные с помощью высокоскоростного процесса с синхронизацией по току, подтверждаются мультифизическим моделированием раздачи патрубка.

Представленные результаты исследования могут способствовать улучшению комплексных свойств аэрокосмического оборудования и прогнозированию технологических дефектов с помощью ПО LS-DYNA, что дает возможность экономить материалы при производстве подобных деталей, применяемых в авиационных комплексных системах кондиционирования воздуха.

**Ключевые слова:** электромагнитная раздача трубы, конечно-элементный анализ, дифференциальные уравнения Максвелла, патрубок с жалюзи, трубчатые детали летательных аппаратов

**Благодарность.** Авторы благодарят кафедру самолето- и вертолетостроения и ЦКП ССМ НГТУ, где проводилась часть исследований.

**Для цитирования:** Ахмед Солиман М.Э., Курлаев Н.В., Шайдунов С.В. Изготовление патрубка с жалюзи системы кондиционирования воздуха ЛА методом раздачи давлением импульсного магнитного поля // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 4. С. 65–74. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183585>



Original article

## Manufacturing of a Branch Tube with Blinds for Air Conditioning Systems of Aircraft by Expansion Pressure of Pulsed Magnetic Field

Mohamed Sherif El Sayed Ahmed Soliman<sup>1</sup>, Nikolai V. Kurlaev<sup>2</sup>✉, Sergei V. Shaidurov<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup> Novosibirsk State Technical University (NSTU),

Novosibirsk, Russian Federation

<sup>1</sup>axmed\_soliman@corp.nstu.ru<sup>2</sup>kurlaev@corp.nstu.ru✉<sup>3</sup>shajdurov@corp.nstu.ru

### Abstract

In the analysis of electromagnetic forming and cutting processes of aircraft parts, it is important to be able to estimate the magnetic pressure acting on the tubular workpiece. For this purpose, the RLC equivalent electrical circuit analysis has been widely used. The authors of this paper used the electromagnetic field finite element analysis to obtain a more realistic pressure distribution for the production of a branch tube with for the aircraft air conditioning system. In this study, the analysis was extended to investigate the effect of the electromagnetic forming system geometry and the workpiece material on the magnetic pressure during tube expansion. The magnetic pressure varies with the geometric parameters of the electromagnetic forming system, as predicted by the circuit analysis, the magnetic pressure decreases with the increase of the tube length. However, there is a limiting length beyond which the pressure no longer decreases. The analysis of electromagnetic forming processes consists of the electric circuit analysis and the plastic deformation of the workpiece, and these analyses are related to each other. The purpose of the electric circuit analysis is to calculate the magnetic pressure and apply it to the deformation analysis. However, in the above approaches, it was assumed that the tubular workpiece and the coil should not be long. Thus, the deformation behavior of the workpiece could only be known at the center of the pipe. The authors performed a finite element analysis of the expansion of the tube under the assumed magnetic pressure distribution, and there was no difference between the calculated and experimental results. The authors obtained a more realistic pressure distribution using the finite element analysis of the electromagnetic field and succeeded in predicting the deformation behavior of the expanding tube.

Advantages and Limitations of Using Electromagnetic Field Pressure (EMP) Tubular Expanding: 1. This method allows for high production speeds 2. Non-contact: Unlike other mechanical processes where the tool contacts the workpiece, EMP, which applies pressure, does not require lubrication, leaves no tool marks and therefore does not require post-forming cleaning. The only exception that requires lubrication is when the workpiece is moved through the die and then removed. 3. Spring Return: The material is loaded into its plastic region, resulting in permanent deformation, so that the spring return often associated with mechanical processes is virtually eliminated since there is no mechanical contact. 4. Strength: The joints made by this process are generally stronger than the parent material. 5. The EMP process provides increased ductility for some aluminum alloys due to the absence of mechanical stress and friction typically encountered in mechanical processes.

**Keywords:** electromagnetic tube expansion, finite element analysis, Maxwell's differential equations, von Mises equivalent stress branch tube with blinds, tubular aircraft parts

**Acknowledgement:** the authors express their gratitude the Department of Aircraft and Helicopter Building and the Center for Collective Usage "Structure, Mechanical and Physical Properties of Materials" at NSTU where the studies were being partially conducted.

**For citation:** Ahmed Soliman M.E., Kurlaev N.V., Shaidurov S.V. Manufacturing of a branch tube with blinds for air conditioning systems of aircraft by expansion pressure of pulsed magnetic field. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 4, pp. 65-74. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183585>



## Введение

Магнитно-импульсная обработка металла начала применяться в середине прошлого века и с тех пор стала одним из самых эффективных методов. Использование магнитного поля в качестве основной силы воздействия на металл позволяет экономить электроэнергию, улучшать экологические показатели и повышать производительность труда на предприятиях, увеличивать количество доступных для обработки материалов. Электромагнитная раздача трубы – это технология, которая использует пульсацию электромагнитной силы для обработки металлических заготовок. По сравнению с традиционной механической обработкой, такая технология может улучшить способность материалов к пластической деформации и увеличить предел их формования примерно в 5–10 раз благодаря высокой скорости деформации. Поскольку электромагнитная сила имеет бесконтактную природу, электромагнитный импульс способен улучшить качество поверхности формируемой заготовки. Процесс электромагнитного формования рассматривается как эквивалентная RLC-цепь в предположении постоянной магнитной взаимной индуктивности. Этот код используется для численного решения уравнений Максвелла. Для расчетов применен метод конечных элементов (МКЭ). Системы дифференциальных уравнений Максвелла записываются в виде [1–3]

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \mathbf{B} = 0; \\ \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho. \end{cases}$$

Электрический ток, проходящий через катушку, можно задать в качестве входной величины, а затем можно рассчитать деформацию заготовки, скорость и напряжение, если известны свойства материала. В случае электромагнитной раздачи патрубка электрический ток можно измерить с помощью пояса Роговского. Лучшее согласие между результатами численных расчетов и результатами эксперимента указывает на более подходящую конститутивную модель. Таким образом, можно проверить правильные параметры для конститутивной модели Джонсона–Кука алюминиевого сплава Д16Т. Более того, в этом случае выполняется 3D-осесимметричное моделирование с упорядоченной сеткой, поскольку плотность сетки в моделях оказывает большое влияние на время моделирования и точность.

Исходя из вышеизложенного, основная цель этой работы заключается в следующем:

1. Предложить процесс электромагнитной раздачи трубы на основе давления электромагнитного поля для улучшения деформации патрубка с жалюзи в осевом направлении.

2. Представить точную модель для предлагаемой топологии электромагнитной раздачи трубы.

3. Исследовать влияние толщины стенки трубы и зазора между матрицей и заготовкой на операцию раздачи трубы с жалюзи. Было установлено, что идеальный зазор должен быть  $\leq 1$  мм.

Причиной неравномерности распределения электромагнитной силы по окружному направлению является зазор между матрицей и алюминиевой трубой, т. е. при протекании пульсирующего тока через катушку электромагнитная сила, возникающая под совместным действием индуцированного вихревого тока и напряженности магнитного поля, заставляет трубу деформироваться. Поэтому необходимо провести детальный анализ механического поля трубы.

Принцип работы влагоотделителя заключается в том, что поток воздуха, содержащий капельную влагу, проходит через входной патрубок в завихритель, где приобретает вращательное движение, при этом капли воды под действием центробежных сил отбрасываются на стенки секции. Жидкость, перемещаясь по стенкам через щели и отверстия, попадает в камеру сбора влаги и выводится через дренажный штуцер. Осушенный воздух поступает далее в систему через выходной патрубок. Рециркуляционный патрубок с жалюзи сконструирован таким образом, что давление между камерой сбора влаги и проточной частью выходного патрубка остается постоянным. Сложность использования таких влагоотделителей обычно связана с малым размером (до 10 мкм) капель влаги. Такие капли плохо отделяются центробежными силами и должны быть укрупнены до размера 30 ... 50 мкм.

## Анализ магнитного поля для модели электромагнитной раздачи трубы

Электромагнитное формование использует высокоэнергетическое магнитное поле для деформации материалов. Это поле создается переходным током, протекающим через катушку. Энергия сохраняется в электростатической форме в конденсаторной батарее путем зарядки конденсаторов от источника питания высокого напряжения и с помощью воздействия сил инерция отталкивает трубу к матрице, чтобы она расширилась, деформировалась и приняла форму элементов жалюзи. Используя переключение искрового промежутка, емкостная энергия разряжается в катушку. Триггерное управление используется для управления переключением разрядника. На рис. 1 показана



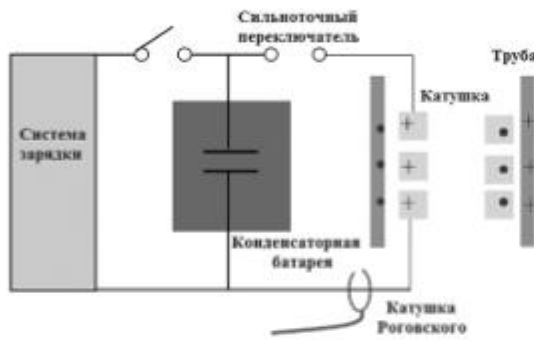


Рис. 1. Схематический план эксперимента по электромагнитной раздате трубы

принципиальная схема эксперимента по электромагнитной раздате трубы. Импульсный ток, возбуждающий катушку, определяется уравнениями (2)–(5) [4–8]. Энергия, запасенная в конденсаторе, определяется по формуле [5]

$$E = \frac{1}{2} CV^2, \quad (1)$$

Результирующий ток  $i(t)$ , протекающий через катушку, имеет затухающую синусоидальную природу и определяется резонансным контуром, образованным эквивалентным сопротивлением, индуктивностью и емкостью системы. Дифференциальное уравнение упрощенной цепи можно записать как

$$\begin{cases} U_c = U_1 + U_2; \\ U_1 = R_0 I_c + L_0 \frac{dI_c}{dt}; \\ U_{\text{катушка}} = RI_c + \frac{dI_c}{dt} + M_{m-w} \frac{dI_w}{dt}; \\ U_c = U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I_c dt; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_{\text{катушка}} + I_c - I_d = 0; \\ R_w I_w + L_w \frac{dI_w}{dt} + M_{m-w} \frac{dI_c}{dt}; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_d = 0, U_c \geq 0; \\ I_d = \frac{U_c}{R_d}, U_c < 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} I_{\text{катушка}} + I_c - I_d = 0; \\ R_f I_f + L_w \frac{dI_f}{dt} + M_{f-w} \frac{dI_c}{dt} + M_{f-w} \frac{dI_w}{dt} = 0; \\ R_w I_w + L_w \frac{dI_w}{dt} + M_{m-f} \frac{dI_f}{dt} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Когда изменяющийся во времени импульсный ток проходит через формирующую катушку, вблизи катушки создается изменяющееся во времени магнитное поле [9–13]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}; \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}_\varphi = -\frac{\partial \mathbf{B}_z}{dt} + \nabla \times (\mathbf{v}_z \times \mathbf{B}_r); \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0; \quad (8)$$

$$\mathbf{J}_\varphi = \frac{I_{\text{катушка}}}{S} = \gamma \mathbf{E}_\varphi, \quad (9)$$

где  $\mathbf{B}$  – плотность магнитного потока;  $\mathbf{E}$  – напряженность электрического поля;  $\mathbf{v}$  – скорость монтажа трубы, равная нулю в исходном состоянии;  $\mathbf{J}$  – плотность наведенного вихревого тока;  $\gamma$  – проводимость трубы. Индексы  $r$ ,  $\varphi$  и  $z$  обозначают радиальную, кольцевую и аксиальную компоненты вектора соответственно. Плотность электромагнитной силы  $\mathbf{F}$  рассчитывается по формуле [2, 6]

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times (\nabla \times \mathbf{A}). \quad (10)$$

Следовательно, индуцированный вихревой ток имеет только окружное направление, а плотность электромагнитной силы рассчитывается по формулам [3, 5]:

$$\mathbf{F}_z = \mathbf{J}_\varphi \times \mathbf{B}_r; \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_r = \mathbf{J}_\varphi \times \mathbf{B}_z, \quad (12)$$

где  $\mathbf{F}_z$  и  $\mathbf{F}_r$  – осевая и радиальная электромагнитные силы соответственно;  $\mathbf{J}_\varphi$  – индуцированный вихрь тока в окружном направлении трубы.

#### Численное моделирование и постановка задачи

Процесс электромагнитного формирования длится несколько сотен микросекунд, и, следовательно, визуализация процесса очень сложна. Численное моделирование процесса позволит не только регистрировать относительное движение жалюзи, но и оценивать такие параметры деформации, как скорость деформации и напряжение. Процессы деформации в таких методах, как ударный тест Тейлора, происходят в тех же временных рамках, что и электромагнитное формирование. Труба из алюминиевого сплава Д16Т использовалась для численного моделирования изготовления патрубка с помощью МКЭ. Длина трубы составляет 70 мм, наружный диаметр 60 мм, толщина стенки 1,5 мм. Катушка, трубчатая заготовка и матрица с семью внутренними оболочными телами жалюзи были расположены осесимметрично. Цилиндрическая катушка соленоида с десятью витками использу-



ется для обеспечения электромагнитной силы на внутренней поверхности трубы заготовки; 10-витковая медная спиральная катушка была смоделирована как жесткий материал, поскольку она не подвергалась пластической деформации во время электромагнитной раздачи патрубка с энергией в 5 кДж. Но патрубок Д16Т был смоделирован с использованием модели прочности Джонсона – Кука, которая имеет следующий вид [14–18]:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}) \times \left[ 1 - \frac{T - T_{\text{КОМН.}}}{T_m - T_{\text{КОМН.}}} \right], \quad (13)$$

где  $A$  – предел текучести;  $B$  – константа упрочнения;  $C$  – чувствительность к скорости деформации;  $n$  – показатель упрочнения;  $m$  – показатель термического размягчения;  $T_m$  – температура плавления. Авторы использовали эту модель для изучения и исследования электромагнитной раздачи трубы с катушкой. В отличие от других авторов – В.А. Глушченкова, И.А. Беляевой [9], нами были предложены три операции – раздача трубы, формирование жалюзи и резание одновременно, и был смоделирован сложной геометрии патрубков с семью элементами жалюзи для производства детали, необходимой в авиастроении.

Кроме того, в настоящем исследовании рассматривается раздача трубы без разрушений, в то время как другие авторы (Оливейра и Ворсвик [19, 20]) рассматривали формовку алюминиевой трубы в свободной форме, но ничего не сообщали об улучшении формуемости трубы. Эти авторы показали, что деформация трубы в результате действия ЭДС выше квазистатических пределов формования, но приписали изменения траектории деформации после разрушения детали.

Схема электромагнитного воздействия на формирование семи элементов жалюзи показана на рис. 2.

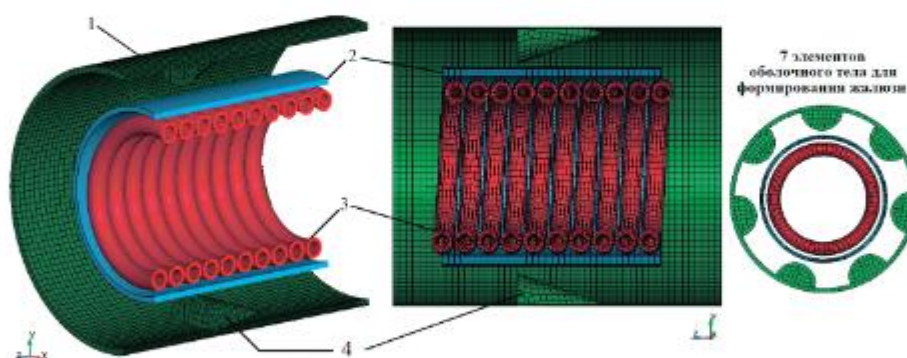


Рис. 2. Схема электромагнитного воздействия на формирование жалюзи:

- 1 – жесткая поверхность матрицы; 2 – заготовка;
- 3 – формирующая катушка; 4 – формирование элемента жалюзи

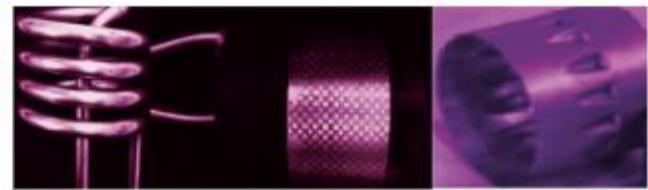


Рис. 3. Оборудование, использованное в эксперименте:  
 а – катушка и труба из алюминия Д16Т;  
 б – готовый патрубок

На рис. 3 представлено оборудование, которое использовалось в эксперименте для изготовления патрубка.

В процессе формования жалюзи стало понятно, что наибольшая степень деформации сосредоточена в средней зоне элемента жалюзи, куда перетекает материал (рис. 4).

На рис. 5,а показан график электрического напряжения на катушке с максимальным значением 3200 В вначале, затем зафиксировано постепенное падение до нуля на завершающем этапе формования элементов жалюзи патрубка. Раздача полой трубы при выбранном пиковом токе была выполнена при токе в диапазоне  $1,39 \cdot 10^5 \sim 7,93 \cdot 10^4$  А.

На рис. 6 представлен график изменения энергии конденсатора батареи. Как видно из графика, начальная максимальная энергия соответствует 5000 Дж и постепенно уменьшается до 1340 Дж за 40 мкс.

Результаты моделирования и эксперимента показали хорошую корреляцию. Таким образом, МКЭ может быть использован для анализа влияния проектных параметров (рис. 7).

На рис. 8,б показан график пластической деформации для формирования элемента жалюзи со значениями 48% для центральной зоны (А), 93% для средней зоны (В), 32% для краевой зоны (С).

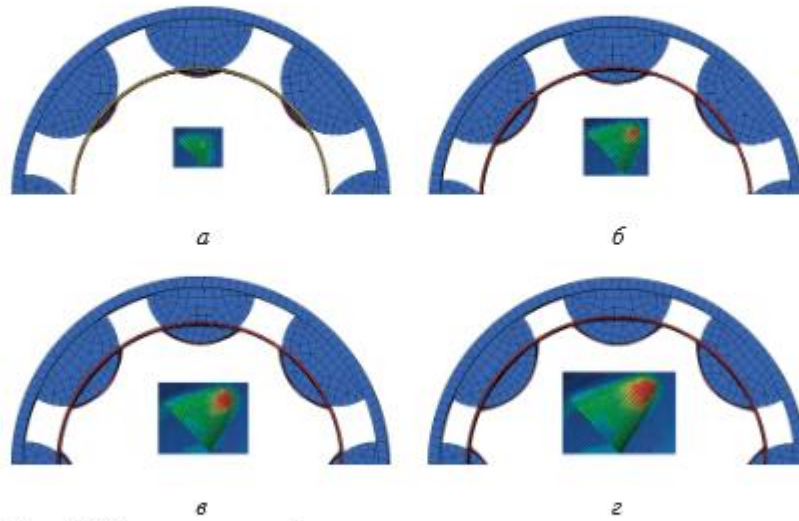
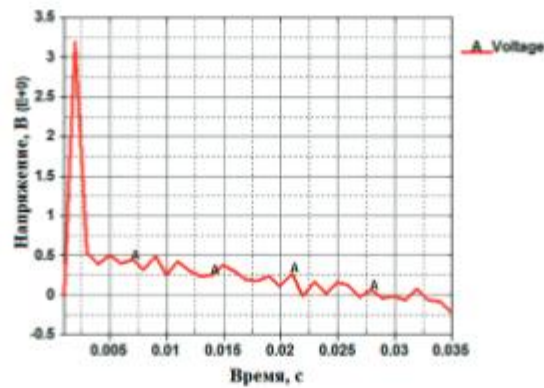
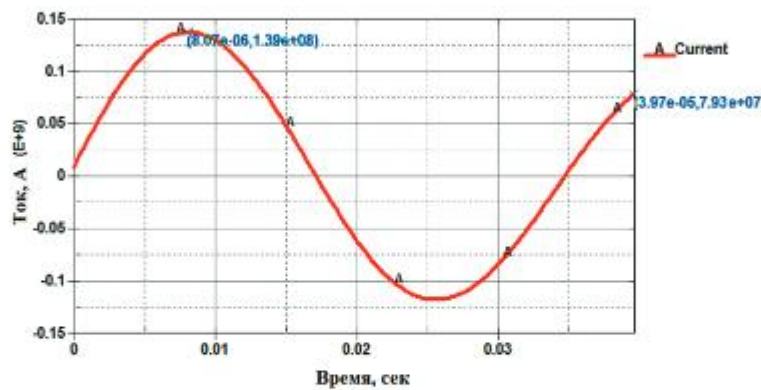


Рис. 4. Пластические деформации на заготовке на разных стадиях формовки жалюзи по времени: а –  $1,2 \cdot 10^{-5}$  с, б –  $1,6 \cdot 10^{-5}$  с, в –  $1,8 \cdot 10^{-5}$  с, г –  $1,9 \cdot 10^{-5}$  с



а



б

Рис. 5. График напряжения на катушке (а); изменение импульса тока в катушке (б)



На рис. 9 представлен график эквивалентного напряжения по Мизесу для контрольных зон, которое составило  $3 \cdot 10^8$  Па.

Внутренняя энергия постепенно увеличивается от 0 до 310 Дж за время от 6 до 20 мкс (рис. 10).

На рис. 11 показано распределение магнитного давления, приложенного к трубчатой заготовке, в зависимости от времени. Направление деформации

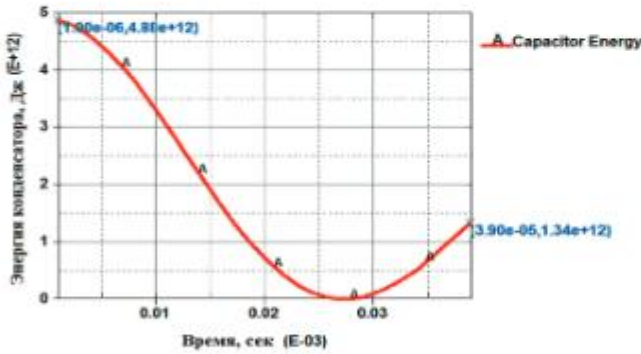


Рис. 6. График изменения энергии конденсатора батареи

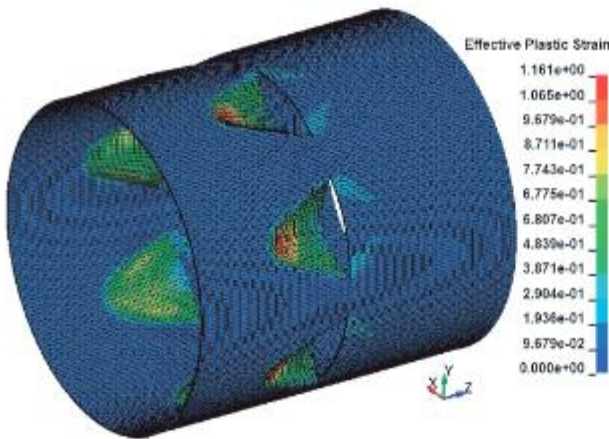


Рис. 7. Сформированная модель патрубке с жалюзи

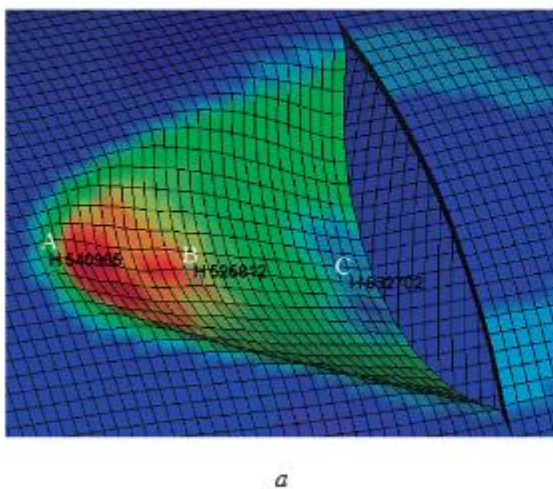


Рис. 8. Окончательный вид элемента жалюзи после раздачи с контрольными зонами A – центральная; B – средняя; C – крайняя (а) и ее пластическая деформация (б)

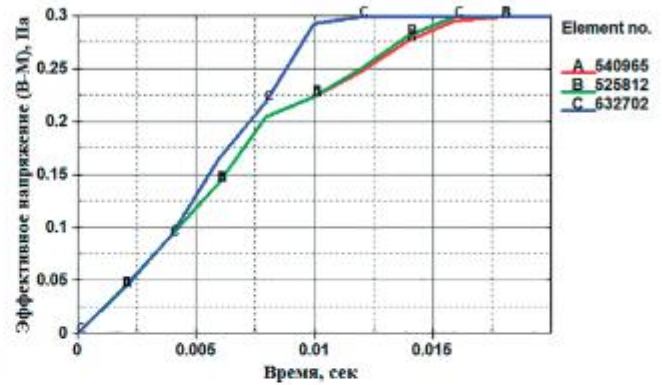
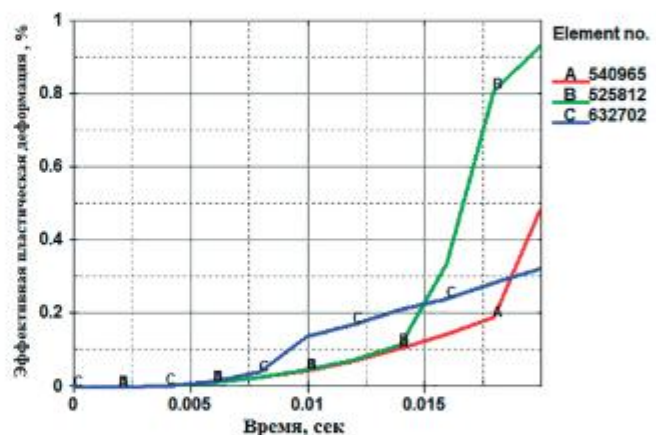


Рис. 9. Эквивалентное напряжение по Мизесу в контрольных зонах

(углубления) жалюзи совпадает с направлением координаты  $Y$ , что обусловлено концентрацией тока в этих областях, когда ток течет с внешней поверхности на внутреннюю [21–25]. Максимальное магнитное давление составляет  $1,7 \cdot 10^8$  Па и находится в зоне A, давление  $1,38 \cdot 10^8$  Па – в зоне B и давление  $4,7 \cdot 10^7$  Па – в зоне C.

**Выводы**

1. В статье представлена технология формирования трубчатой детали летательного аппарата – алюминиевого патрубке с жалюзи – методом раздачи импульсным магнитным полем, которое варьируется в зависимости от геометрических параметров электромагнитной формовочной системы. Магнитное давление уменьшается с увеличением длины трубы. Однако существует длина, за пределами которой давление уже не снижается. Эта длина практически равна длине формирующей катушки, т.е. чем меньше построено элементов жалюзи на патрубке, тем лучше распределяется давление магнитного поля. Максимальное давление магнитного поля в зоне





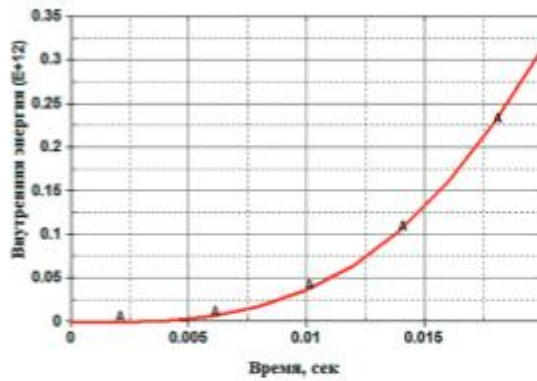
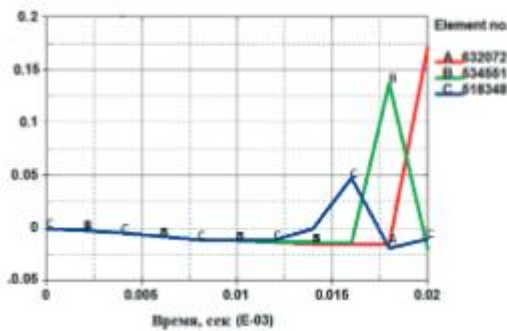
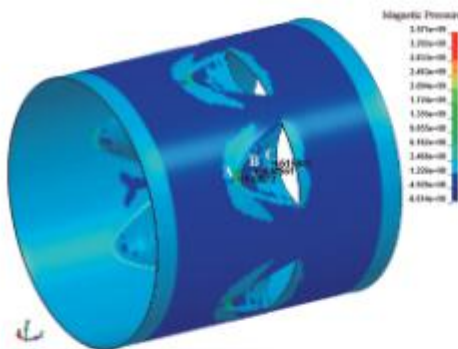


Рис. 10. Внутренняя энергия при формировании заготовки



а



б

Рис. 11. Магнитное давление вдоль трубчатой заготовки от времени:  
 а – график кривых магнитного давления;  
 б – распределение магнитного давления на трубчатой заготовке с жалюзи

элемента А составляет 171 МПа, в этой зоне есть признак разрушения.

2. Эквивалентное напряжение по Мизесу для контрольных зон составляет 300 МПа [21]. Пиковый уровень электрического напряжения в 3,2 кВ привел к равномерному расширению трубы.

Было обнаружено, что значение пикового напряжения при определенном количестве витков катушки является решающим и вызывает либо расширение, либо фрагментацию расширяющейся трубы.

3. Численные результаты показывают, что при использовании предложенного метода электромагнитной раздачи труб сила Лоренца равномерно распределяется по всей поверхности детали, и это может значительно увеличить конечную деформацию трубы и сделать осевую деформацию трубы более равномерной.

4. Численный метод конечных элементов, использованный в этом исследовании, позволяет изучить процесс раздачи трубы электромагнитным импульсом.

5. Во время электромагнитной раздачи трубы нельзя игнорировать эффект свойств материала (модель прочности Джонсона–Кука) и значение идеального зазора  $\leq 1$  мм. Прогнозируемые результаты хорошо согласуются с экспериментальными результатами, которые важны для анализа оптимального проектирования и настройки параметров системы.

**Список источников**

1. Головащенко С.Ф., Овчинников А.Г., Шутков Р.Б. Методика проектного расчета многовитковых цилиндрических индукторов для электромагнитной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 1995. №10. С. 8–10.
2. Ахмед Солиман М.Э., Курлаев Н.В. Воздействие магнитно-импульсного давления на формовку-вытяжку листового металла // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. № 2. С. 16–20.
3. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L. et al. Electromagnetic forming a review // Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211. No. 5, pp. 787–829. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012
4. Журавлев С.В., Зечихин Б.С., Кузьмичев Р.В. Аналитический расчет магнитного поля в активной зоне синхронных машин с постоянными магнитами // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 197–209.
5. L'Eplattenier P., Ashcraft C., Ulaca I. An MPP version of the Electromagnetism module in LS-DYNA for 3D Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulation // 4th International Conference on High Speed Forming (9–10 March 2010; Columbus, Ohio, USA), pp. 250–263. DOI: 10.17877/DE290R-8665
6. Siddiqui M.A., Correia J.P.M., Ahzi S., Belouettar S. Electromagnetic forming process: estimation of magnetic pressure in tube expansion and numerical simulation // International Journal of Material Forming. 2009. Vol. 2, pp. 649–652. DOI: 10.1007/s12289-009-0431-y
7. Durney C.H., Johnson C.C. Introduction to Modern Electromagnetics. – New York: McGraw-Hill, 1969. – 163 p.
8. Cao Q., Du L., Li Z. et al. Investigation of the Lorentz-force-driven sheet metal stamping process for cylindrical cup forming // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 271, pp. 532–541. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.03.002



9. Глуценков В.А., Беляева И.А. Раздача труб импульсным магнитным полем. Результаты компьютерного моделирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17 № 6 (3). С. 657–665.
10. Ахмед Солиман М.Э. Исследование деформирования листовых алюминиевых сплавов при формообразовании деталей летательных аппаратов давлением импульсного магнитного поля: Дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2022. – 239 с.
11. Cao Q., Li L., Lai Z. et al. Dynamic analysis of electromagnetic sheet metal forming process using finite element method // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 74, pp. 361–368. DOI: 10.1007/s00170-014-5939-8
12. Журавлев С.В., Зечихин Б.С., Иванов Н.С., Некрасова Ю.Ю. Аналитическая методика расчета магнитного поля в активной зоне электрических машин со сверхпроводящими обмотками возбуждения и якоря // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 189–201.
13. Сухачев К.И., Дорофеев А.С. Разработка и исследование магнитоиндукционных систем ускорения микрометеоритов и техногенных космических частиц // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 134–142.
14. Бузюркин А.Е., Гладкий И.Л., Краус Е.И. Определение параметров модели Джонсона–Кука для описания процессов деформирования и разрушения титановых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56. № 2(330). С. 188–195. DOI: 10.15372/PMTF20150219
15. Сметанников О.Ю., Жила В.В. Адаптация модели Джонсона–Кука для расчета промежуточной проковки наплавляемых изделий в ANSYS Mechanical APDL // Master's Journal. 2023. № 2. Art. № 07.
16. Abdelhafeez A., Nemat-Alla M., El-Sebaie M.G. Finite element analysis of electromagnetic bulging of sheet metals // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2012. Vol. 3. No. 2, pp. 180–186.
17. Correia J.P.M., Siddiqui M.A., Ahzi S. et al. A simple model to simulate electromagnetic sheet free building process // International Journal of Mechanical Sciences. 2008. Vol. 50. No. 10–11, pp. 1466–1475. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2008.08.008
18. Holt D.L., Babcock S.G., Green S.J. and Maiden C.J. The strain-rate dependence of the flow stress in some aluminum alloys // Transactions of the ASM: transactions quarterly. 1967. Vol. 60, pp. 152–159.
19. Oliveira D.A., Worswick M.J. Electromagnetic forming of aluminium alloy sheet // Journal de Physique IV. 2003. Vol. 110, pp. 293–298. DOI: 10.1051/jp4:20020709
20. Oliveira D.A., Worswick M.J., Finn M., Newman D. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: free-form and cavity fill experiments and model // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 170. Nos. 1–2, pp. 350–362.
21. Ахмед Солиман М.Э., Курлаев Н.В., Шайдуров С.В. Совершенствование технологии электромагнитного обжима патрубка с жалюзи системы воздухообмена летательных аппаратов путем численного моделирования // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 96–105. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182564>
22. Хаустов В.М. Устройство для деформирования трубчатой оболочки энергией импульсного магнитного поля // Механика процессов и машин: Межвуз. тем. сб. науч. тр. Омск: ОмГТУ, 1997. С. 77–79.
23. Manea T.E., Verweij M.D., Blok H. The importance of velocity term in the electromagnetic forming process // 27th General Assembly of the International Union of Radio Science (17–24 August 2002; Maastricht), pp. 112–115.
24. Geier M., Paese E., Rossi R. et al. Experimental analysis of interference-fit joining of aluminum tubes by electromagnetic forming // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2020. Vol. 30. No. 4. DOI: 10.1109/TASC.2020.2972499
25. Ouyang S., Li X., Li Ch. et al. Investigation of the electromagnetic attractive forming utilizing a dual-coil system for tube bulging // Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 49, pp. 102–115. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.006

## References

1. Golovashchenko SF, Ovchinnikov AG, Shutov RB. Methodology for design calculation of multi-turn cylindrical inductors for electromagnetic stamping. *Kuznechno-shtampovnochnoe proizvodstvo*. 1995;(10):8–10. (In Russ.).
2. Kurlaev NV, Akhmed Soliman ME. Impact of magnetic-pulse pressure on the spinning of sheet metal. *Kuznechno-shtampovnochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2023;(2):16–20. (In Russ.).
3. Psyk V, Risch D, Kinsey BL. et al. Electromagnetic forming a review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011;211(5):787–829. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012
4. Zhuravlev SV, Zechikhin BS, Kuz'michev RV. Analytical calculation of magnetic field in active zone of synchronous machines with permanent magnets. *Aerospace MAI Journal*. 2016;23(1):197–209. (In Russ.).
5. L'Eplattenier P, Ashcraft C, Ulaca I. An MPP version of the Electromagnetism module in LS-DYNA for 3D Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulation. *4th International Conference on High Speed Forming (March 9-10, 2010; Columbus, Ohio, USA)*. DOI: 10.17877/DE290R-8665
6. Siddiqui MA, Correia JPM, Ahzi S, Belouettar S. Electromagnetic forming process: estimation of magnetic pressure in tube expansion and numerical simulation.



- International Journal of Material Forming*. 2009;2:649–652. DOI: 10.1007/s12289-009-0431-y
7. Durney CH, Johnson CC. *Introduction to Modern Electromagnetics*. New York: McGraw-Hill; 1969. 163 p.
  8. Cao Q, Du L, Li Z. et al. Investigation of the Lorentz-force-driven sheet metal stamping process for cylindrical cup forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019;271:532–541. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.03.002
  9. Glushchenkov VA, Belyaeva IA. Distribution pipes pulsed magnetic field. The results of computer simulation. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2015;17(6):657–665. (In Russ.).
  10. Akhmed Soliman ME. *Issledovanie deformirovaniya listovykh alyuminievykh splavov pri formoobrazovanii detalei letatel'nykh apparatov davleniem impul'snogo magnitnogo polya* (Study of deformation of sheet aluminum alloys during shaping of aircraft parts by pulsed magnetic field pressure), Ph.D. thesis. Novosibirsk: NSTU; 2022. 239 p. (In Russ.).
  11. Cao Q, Li L, Lai Z. et al. Dynamic analysis of electromagnetic sheet metal forming process using finite element method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;74:361–368. DOI: 10.1007/s00170-014-5939-8
  12. Zhuravlev SV, Zechikhin BS, Ivanov NS, Nekrasova YY. Analytical technique for magnetic field calculation in active zone of electric motors with superconducting excitation and armature windings. *Aerospace MAI Journal*. 2018;25(4): 189-201. (In Russ.).
  13. Sukhachev KI, Dorofeev AS. Development and study of magnetic induction systems for micrometeorites' and cosmic particles' acceleration. *Aerospace MAI Journal*. 2017;24(3):134-142. (In Russ.).
  14. Buzyurkin AE, Gladkii IL, Kraus EI. Determination of parameters of the johnson-cook model for the description of deformation and fracture of titanium alloys. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2015;56(2):188–195. (In Russ.). DOI: 10.15372/PMTF20150219
  15. Smetannikov OYu, Zhila VV. Adaptation of the Johnson–Cook model for calculating of interim forging of deposited products in the ANSYS mechanical APDL. *Master's Journal*. 2023;(2):07. (In Russ.).
  16. Abdelhafeez A, Nemat-Alla M, El-Sebaie MG. Finite element analysis of electromagnetic bulging of sheet metals. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2012;3(2):180-186.
  17. Correia JPM, Siddiqui MA, Ahzi S. et al. A simple model to simulate electromagnetic sheet free building process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2008;50(10-11):1466–1475. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2008.08.008
  18. Holt DL, Babcock SG, Green SJ, Maiden CJ. The strain-rate dependence of the flow stress in some aluminum alloys. *Transactions of the ASM: transactions quarterly*. 1967;60:152–159.
  19. Oliveira DA, Worswick MJ. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet. *Journal de Physique IV*. 2003;110:293-298. DOI: 10.1051/jp4:20020709
  20. Oliveira DA, Worswick MJ, Finn M, Newman D. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: free-form and cavity fill experiments and model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;170(1-2):350-362.
  21. Ahmed Soliman ME, Kurlaev NV, Shaidurov SV. Improving the Technology of Electromagnetic Compression of Branch Tube with Blinds of the Air Exchange System of Aircraft by Numerical Simulation. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(3):96-105. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=182564>
  22. Khaustov VM. Device for deformation of a tubular shell by the energy of a pulsed magnetic field. In: *Mekhanika protsessov i mashin, Mezhdunarodskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov*. Omsk: OmGTU; 1997. p. 77-79. (In Russ.).
  23. Manea TE, Verweij MD, Blok H. The importance of velocity term in the electromagnetic forming process. *27<sup>th</sup> General Assembly of the International Union of Radio Science (August 17-24, 2002; Maastricht)*. p. 112–115.
  24. Geier M, Paese E, Rossi R. et al. Experimental analysis of interference-fit joining of aluminum tubes by electromagnetic forming. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020;30(4). DOI: 10.1109/TASC.2020.2972499
  25. Ouyang S, Li X, Li Ch. et al. Investigation of the electromagnetic attractive forming utilizing a dual-coil system for tube bulging. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;49:102–115. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.006

Статья поступила в редакцию 26.09.2024; одобрена после рецензирования 24.10.2024; принята к публикации 29.10.2024.  
The article was submitted on 26.09.2024; approved after reviewing on 24.10.2024; accepted for publication on 29.10.2024.