

Научная статья

УДК 621.98.044.7:621.757.002

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182564>

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОБЖИМА ПАТРУБКА С ЖАЛЮЗИ СИСТЕМЫ ВОЗДУХООБМЕНА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПУТЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

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

<sup>1</sup> [ahmed\\_soliman@corp.nstu.ru](mailto:ahmed_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.** Электромагнитный обжим трубы представляет собой высокоскоростной процесс формирования электромагнитных импульсов. Этот процесс можно использовать для соединения металлической трубы с другой трубой и стержнем, а традиционный метод формовки можно частично заменить. Цель исследования – совершенствование технологии электромагнитной формовки патрубка с жалюзи, применительно к трубчатым деталям летательных аппаратов. Основными проблемами являются контроль процесса формовки жалюзи, точная формовка и точное измерение труб большого диаметра. В статье использовался аналитический метод, основанный на электромагнитном взаимодействии между катушкой и трубой. Этот процесс обжима применяется к проводящим материалам, рассматриваемым как заготовки, соответствующие индуктивности катушки, присоединенной к RLC-цепи, и индуктивности трубы. В данной работе была определена теоретическая связь между ЭДС и параметрами процесса, проанализировано влияние на обжим патрубка напряжения разряда и технологических параметров жалюзи. Для подбора идеального зазора между матрицей и заготовкой было выполнено несколько расчетов с разными зазорами 1–3 мм. Было установлено, что идеальный зазор должен быть  $\leq 1$  мм, т. е. первой причиной неравномерности распределения электромагнитной силы по окружному направлению является неудачно выбранный зазор между матрицей и алюминиевой трубой. Можно отметить, что чем больше зазор, тем хуже складываются жалюзи в форму матрицы, так как требуется большее напряжение, а чем меньше зазор, тем они лучше складываются в форму матрицы. Это зависит от количества элементов оболочного тела, которое нужно построить на трубчатой заготовке. Чем меньше было построено жалюзи на трубчатой заготовке, тем деформация более равномерно распределялась по трубе. Также можно отметить, что форма спиральной катушки, количество ее витков и расстояние между витками существенно влияют на распределение электромагнитной силы и равномерность деформации по алюминиевой трубе.


**Ключевые слова:** электромагнитный обжим трубы, электродвижущая сила, граничные условия для обжима трубы, эквивалентное напряжение по Мизесу, 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., 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>

Original article

## IMPROVING THE TECHNOLOGY OF ELECTROMAGNETIC COMPRESSION OF BRANCH TUBE WITH BLINDS OF THE AIR EXCHANGE SYSTEM OF AIRCRAFT BY NUMERICAL SIMULATION

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, Russia

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

### Abstract

Electromagnetic tube compression is a high-speed process of generating electromagnetic pulses. This process can be used to connect a metal tube with another tube or rod, and the traditional forming method can be partially replaced. The purpose of this research is the development and application of a branch tube electromagnetic forming technology, and the main problems are control of the branch tube forming process, precise forming and accurate measurement of large diameter tube. In this paper, we used an analytical method based on the mutual force between the coil and the tube. This compression process is applied to conductive materials considered as tube corresponding to the inductance of the coil connected to the RLC circuit and the inductance of the tube. In this work, the theoretical relationship between electromagnetic force and process parameters was determined, and the influence of discharge voltage and technological parameters of blinds was analyzed. In order to select the ideal gap between the die and the workpiece in the pulsed magnetic field pressure crimping operation for the production of a tube with blinds, several calculations were performed with different gaps of 1~3 mm. It was found that the ideal gap should be  $\leq 1$  mm, that is, the first reason for the uneven distribution of the electromagnetic force in the circumferential direction is the gap between the die and the aluminum tube. It can be noted that the larger the gap, the worse the blinds are folded into the shape of the die, since more voltage is required, and the smaller the gap, the better the blinds are folded into the shape of the die. This depends on the number of elements of the shell body that needs to be built on the tubular workpiece, the fewer blinds were built on the tubular workpiece, the more evenly the deformation was distributed on the blinds and the tube. It can also be noted that the shape of the spiral coil, the number of its turns and the distance between the turns are the main reason that affects the distribution of the electromagnetic force and the uniformity of the deformation along the aluminum tube.

**Keywords:** electromagnetic tube compressing, electromotive force, boundary conditions for compressing the electromagnetic tube, von Mises equivalent stress, branch tube with shutters, aircraft tubular 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. 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, vol. 31, no. 3, pp. 96-105. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182564>

### Введение

Развитие машиностроения и вывод его на принципиально новые ресурсосберегающие технологии, повышение производительности труда и качества продукции основываются на применении новых технологических процессов, к числу которых относятся высокоскоростные методы обработки металлов давлением (ОМД). В настоящее время внедрение достижений науки в производство затруднено в связи с недостатком инвестиций, жесткими требованиями и нестабильностью товарного рынка, поэтому особенно актуальной становится

задача создания методов проектирования ресурсосберегающих технологий и оборудования, обеспечивающих минимальную энергоёмкость операций [1, 2]. Развитие экономики нашей страны и решение стратегических задач невозможно без всеобъемлющего перевооружения производства на базе передовых достижений отечественной и мировой науки, внедрения прогрессивных технологий, которые обеспечивают повышение научно-технического уровня и эффективности производства. Различного типа тонкостенные трубчатые детали ( $S/R < 0,1$ , где  $S$  – толщина стенки детали,  $R$  – радиус трубы)

широко используются в авиастроении. Применение такого типа деталей обусловлено их небольшой массой при достаточной прочности и жесткости, что в конечном итоге ведет к повышению надежности, снижению себестоимости и массы изделий авиастроения [3, 4].

В статье представлено решение актуальной научно-технической задачи в области развития технологии и оборудования для авиастроения, в частности теоретически обоснованы новые технологические режимы для деформирования трубчатых заготовок из алюминиевых сплавов, выявлены особенности их формоизменения при изготовлении патрубка с жалюзи обжимом давления импульсного магнитного поля. Разработана математическая модель, описывающая электромагнитные и механические процессы, происходящие в системе «установка индуктор–заготовка», с учетом режимов работы, параметров и геометрии индуктора и заготовки в операции электромагнитного обжима трубчатых деталей [5–7].

Целью исследований является создание и реализация новых технологических режимов для электромагнитного обжима трубчатых заготовок, обеспечивающих определение энергии зарядки установки для операций обжима трубчатых заготовок. Для достижения поставленных целей был создан алгоритм расчета и проектирования технологических операций обжима трубчатых заготовок и выбора рациональных параметров системы «оборудование–инструмент–заготовка».

Операция обжима патрубка применяется для изготовления цельноштампованных переходников, тяг управления, а также герметичных оболочек баллонов высокого давления в авиастроении. Наиболее широко применяемый способ – обжим осевым усилием по жесткой матрице, приложенным к центру или торцу трубчатой заготовки. Проблемы в практическом применении данного способа возникают из-за потери устойчивости деформируемой заготовки в зоне передачи усилия, основным ограничивающим фактором является окружная потеря устойчивости в виде образования продольного гофра [8–11].

При исследовании была принята гипотеза упругопластического тела, упрочняющегося по линейной зависимости, а деформация заготовки в процессе деформирования была постоянной и составляла 0,6 при выполнении формоизменяющих операций обжима. После проведения эксперимента были получены зависимости тока и напряжения катушки от энергии конденсатора и времени обжима для патрубка с жалюзи при обжиме давлением импульсного магнитного поля [2, 12, 13]. В результате проведенной работы исследован способ обжима

особотонкостенных трубчатых заготовок, получены математические зависимости для расчета их напряженно-деформированного состояния, которые удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента.

Электромагнитный обжим трубы – это бесконтактный процесс, в котором электромагнитная сила деформирует заготовку с высокой скоростью. Во время воздействия ЭДС заготовка может достичь скорости порядка 100 м/с менее чем за 0,3 мс. Динамика этого процесса улучшает формуемость заготовки, уменьшает складки и упругость, что расширяет возможности применения труднодеформируемых материалов. Процесс основан на уравнениях Максвелла, которые описывают, как электрические и магнитные поля генерируются зарядами и токами, изменяющимися во времени. Первоначально батарея конденсаторов заряжается значительным количеством электрической энергии, порядка десятков килоджоулей. Затем вокруг катушки создается переходное магнитное поле. В металлических материалах индуцируются вихревые токи, которые текут в направлении, противоположном их направлению в катушке. Противоположные магнитные поля создают силу отталкивания между заготовкой и катушкой, называемую силой Лоренца, которая заставляет заготовку деформироваться с высокой скоростью.

## 1. Анализ магнитного поля для модели электромагнитного обжима трубы

В электромагнитной модели часто бывает удобно выбрать в качестве системной переменной магнитный векторный потенциал  $\vec{A}$ . В трубчатой области путем подстановки материальных уравнений электромагнитного поля в уравнения Максвелла можно получить следующее уравнение [14–16]:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \times \vec{A} \right) = -\gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, Гн/м;

$\gamma$  – проводимость среды, См/м;

$-\gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$  – плотность наведенного тока в трубе, А/м<sup>2</sup>.

Согласно уравнениям Максвелла магнитная сила  $\vec{f}$  в единице объема среды (плотность магнитной силы) выражается следующим уравнением:

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} = \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}, \quad (2)$$

где  $\vec{j}$  – плотность тока в катушке, А/м<sup>2</sup>;  $\vec{B}$  – плотность магнитного потока, Тл. Следовательно, магнитные силы, действующие на трубу и выраженные через  $\vec{A}$ , можно получить, подставив  $\nabla \times \vec{A} = \vec{B}$  в

уравнение (2), и использовать в качестве входной нагрузки в механической модели.

Можно предположить следующее [17]: 1) ток катушки распределен равномерно по сечению; 2) проницаемость и проводимость материалов постоянны и изотропны; 3) током смещения пренебрегаем.

Могут быть установлены следующие граничные условия (рис. 1): в декартовой системе координат  $\vec{B}$  при  $y = 0$  перпендикулярна к оси  $X$ ; в декартовой системе координат  $\vec{A}$  в точке  $x = 0$  равна нулю; в полярной системе координат область бесконечности устанавливается на внешней границе воздушной области дальнего поля. Импульс тока через катушку является нагрузкой в электромагнитной модели, которую легко измерить экспериментально. Считается, что первый период тока отвечает за сжатие трубы. Ток приблизительно выражается в виде

$$I = U \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\beta T} \sin(\omega t). \quad (3)$$

Механическая модель связана только с трубой и катушкой. Обычно желательна лишь умеренная деформация из-за ограничений, налагаемых пластическим короблением при сжатии электромагнитной трубы. Таким образом, анализ деформации не учитывает коробление. Учитываются инерционные эффекты, поскольку напряжение является временным. Для решения уравнения переходного динамического равновесия выбран метод интегрирования по времени Ньюмарка, используемый в ANSYS/LS-DYNA [18, 19]:

$$M\ddot{u} + \dot{C}\dot{u} + Ku = F^a, \quad (4)$$

где  $M$  – матрица масс конструкции, кг;  $\dot{C}$  – матрица демпфирования конструкции, кг/с;  $K$  – матрица жесткости конструкции кг/с<sup>2</sup>;  $\ddot{u}$  – вектор углового

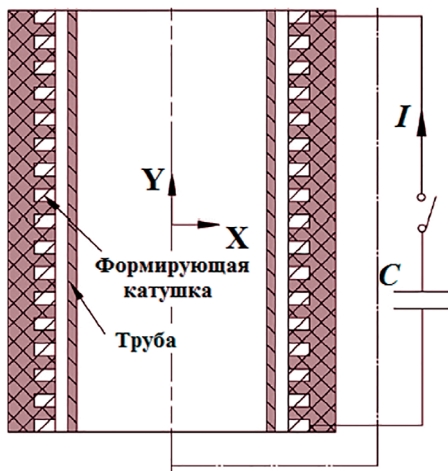


Рис. 1. Модель системы для электромагнитного обжима трубы

ускорения, м/с<sup>2</sup>;  $\dot{u}$  – вектор угловой скорости, м/с;  $u$  – вектор углового перемещения, м;  $F^a$  – вектор приложенной нагрузки, Н.

## 2. Численное моделирование и постановка задачи

Модуль электромагнетизма (ЭМ) в LS-DYNA способен описывать сложные процессы, в которых магнитное давление создает силы Лоренца, вызывающие механические напряжения и пластическую деформацию материалов. Модуль ЭМ позволяет вводить электрический ток в проводник, затем вычислять связанные магнитное поле, электрическое поле и индуцированные токи путем решения уравнений Максвелла в ходе моделирования [20]. Электромагнитный обжим трубы был выполнен мультифизическим моделированием методом конечных элементов (МКЭ). Установлены электромагнитная и механическая модели. Сначала на основе электромагнитной модели рассчитываются переходные магнитные силы, которые затем используются в качестве входной нагрузки для моделирования высокоскоростной деформации трубы по механической модели на каждом временном шаге. После этого переходные магнитные силы рассчитываются на основе обновленной геометрии трубы на следующем временном шаге. Метод конечных элементов используется для сплошного проводника в сочетании с методом граничных элементов (МГЭ) для окружающего воздуха, где генерируются магнитные и электрические поля [21]. МГЭ желательно использовать, поскольку воздух не нужно учитывать, что благоприятно сказывается на значении ЭДС, когда задействованы геометрии проводников, т.е. спиральная катушка в этом исследовании. Кроме того, сила Лоренца, полученная из решателя ЭМ, используется в механическом анализе на каждом временном шаге для прогнозирования деформации заготовки. Затем смещение заготовки учитывается по лагранжевому вычислению электромагнитного поля для следующего временного шага. Геометрия и размеры катушки и заготовки, которые использовались в эксперименте, были смоделированы в LS-PREPOST. Свойства материала трубы были определены с помощью внутренних испытаний стержня Кольского при различной скорости деформации и описаны законом упрочнения материала:

$$\sigma = C\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m, \quad (5)$$

где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$  – напряжение, деформация и скорость деформации соответственно;  $C$ ,  $m$  и  $n$  – константы материала.

Схема электромагнитного обжима трубы при формировании жалюзи показана на рис. 2, где цилиндрическая катушка является распределитель-



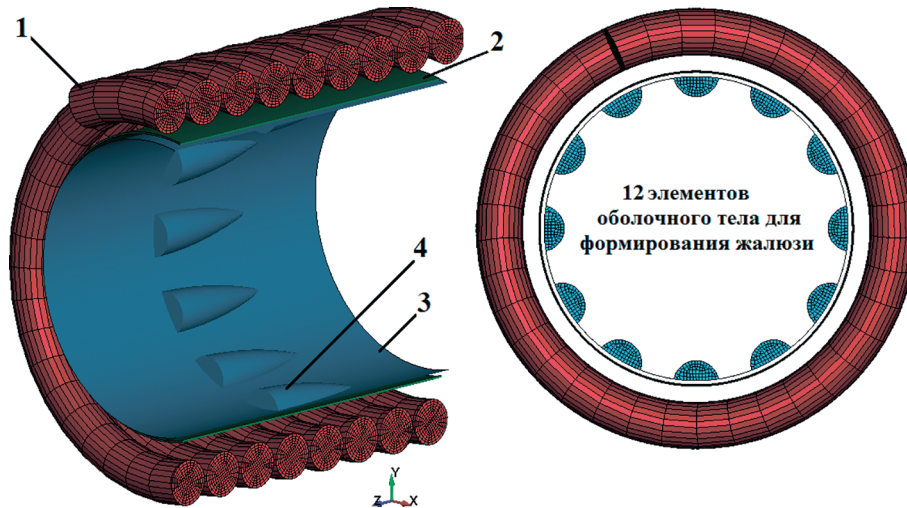
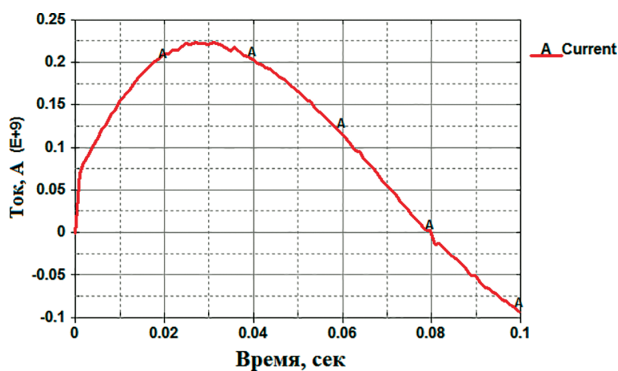


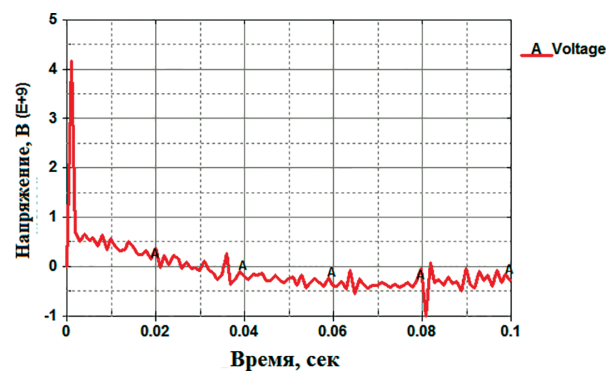
Рис. 2. Схема электромагнитного воздействия при формировании жалюзи: 1 – формирующая катушка; 2 – заготовка; 3 – жесткая поверхность матрицы; 4 – элемент формирования жалюзи

ной; активное управление с восемью оборотами. Труба из алюминиевого сплава Д16Т использовалась для численного моделирования изготовления патрубка. Длина трубы составляет 112 мм, наружный диаметр 95 мм, толщина стенки 0,5 мм. Катушка, трубчатая заготовка и матрица с 12 внутренними оболочными телами были расположены осесимметрично [22]. Схема электромагнитного воздействия при формировании 12 элементов жалюзи является темой данной статьи.

Ток (рис. 3,а) получен в результате моделирования катушки во время процесса. Он измеряется с помощью катушки Роговского с широкой полосой пропускания от 100 Гц до 5 МГц. Частота среза имеет значение 5 МГц. Для каждой измеренной единицы выходного напряжения катушка Роговского имеет коэффициент преобразования 128 кА/В и чувствительность 7 мВ/А. При напряжении 4 кВ (рис. 3,б) пик тока составляет 220 кА.



а



б

Рис. 3. Изменение импульса тока в катушке (а); напряжения на катушке (б)

На рис. 4 представлен график изменения энергии конденсатора батареи. Как видно из графика, начальная максимальная энергия 4,8 кДж постепенно уменьшается до 1 кДж за 100 мкс.

Эквивалентное напряжение по Мизесу в процессе формирования жалюзи внутреннего обжима трубы показало, что наибольшее напряжение сосредоточено в средней зоне элемента жалюзи, куда прижимаются зерна материала из-за малого радиуса элемента (рис. 5).

На рис. 6 показан график расчета пластических деформаций при формировании элемента жалюзи. Максимальная деформация составляет 0,67 и находится в центральной зоне элемента (В), 0,36 по краевой зоне элемента (С) и 0,03 по верхней зоне элемента (А).

Результаты моделирования и эксперимента показали хорошую корреляцию. Таким образом, разработанная модель может быть использована

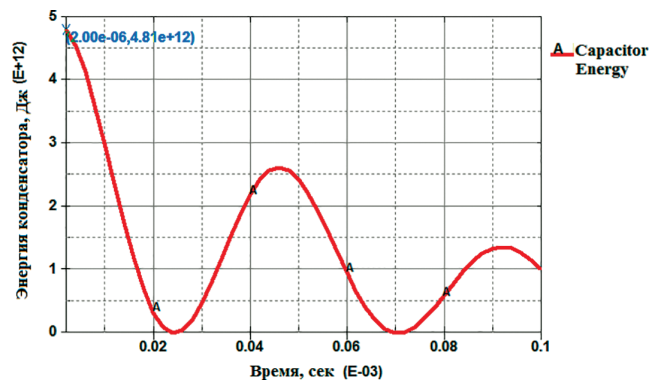


Рис. 4. График изменения энергии конденсатора батареи

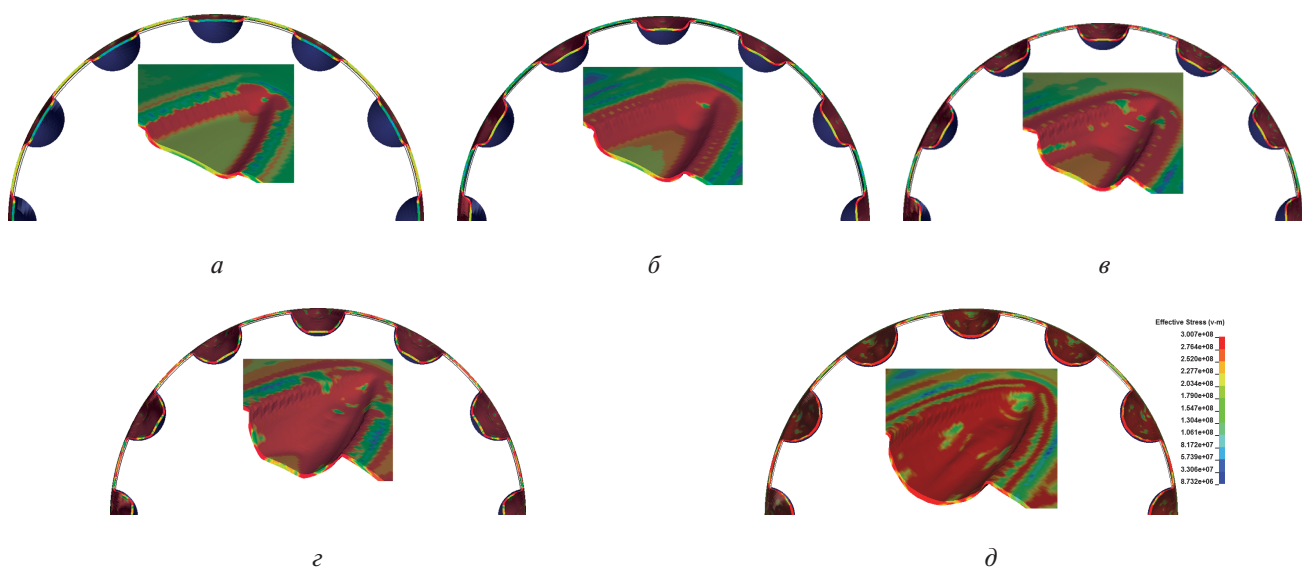


Рис. 5. Эквивалентное напряжение по Мизесу на заготовке на разных стадиях формовки жалюзи по времени: а –  $1,3e-5$  с; б –  $1,6e-5$  с; в –  $1,8e-5$  с; г –  $2e-5$  с; д –  $2,2e-5$  с

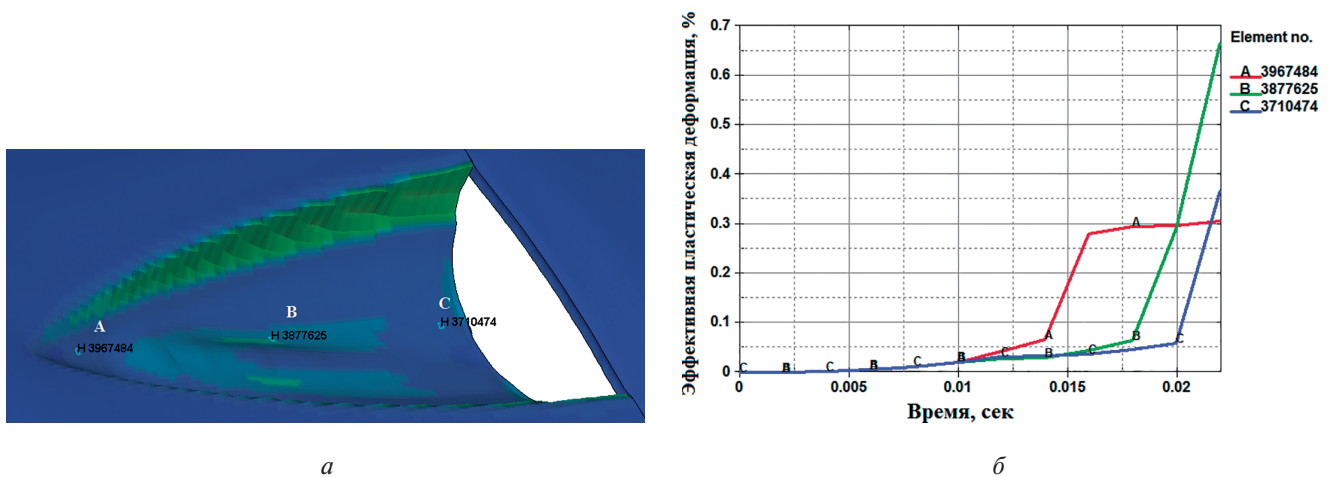


Рис. 6. Окончательный вид элемента жалюзи после обжима с контрольными зонами (а) и его пластическая деформация (б)

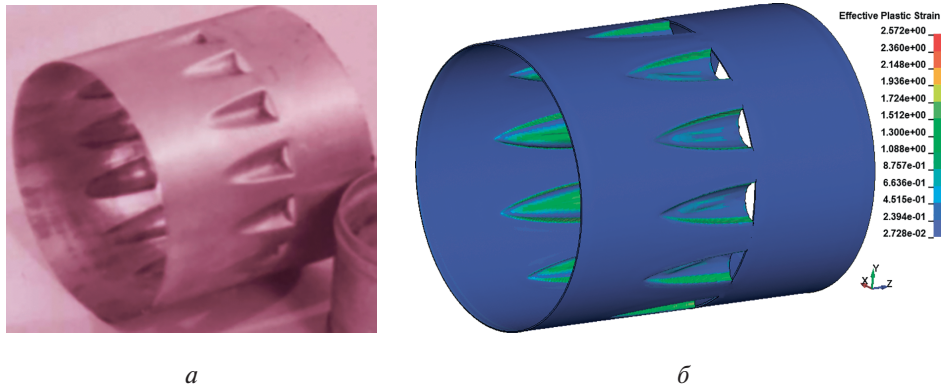


Рис. 7. Сформированный патрубок с жалюзи: *a* – экспериментально; *б* – моделирование

для анализа влияния проектных параметров на формирование детали рис. 7*a,б*.

На рис. 8 представлен график эквивалентного напряжения по Мизесу, в контрольных зонах составившего 300 МПа.

На рис. 9 показана корреляция результатов в краевой зоне элемента с высотой 6,5 мм (рис. 9*a*) для *Y*-смещения (рис. 9*б*), подтверждающая, что численная модель способна достаточно хорошо предсказать *Y*-смещение, связанное с распределением магнитно-импульсного давления, создаваемого спиральной катушкой, на заготовку.

На рис. 10 показано распределение магнитного давления, приложенного к трубчатой заготовке, в зависимости от времени. Область углубления оболочного тела жалюзи согласуется с системой координат по направлению *Y*, что обусловлено концентрацией тока в этих областях, когда ток течет с внешней поверхности на внутреннюю. Максимальное магнитное давление составляет 210 МПа и находится в зоне элемента А, 193 МПа в зоне элемента В и 190 МПа в зоне элемента С.

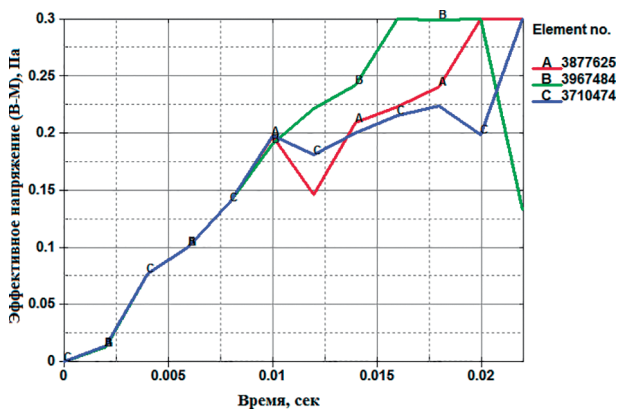


Рис. 8. Эквивалентное напряжение по Мизесу в контрольных зонах

### Выводы

1. Основная цель данного исследования – аналитическое и численное моделирование магнитного давления при обжиге металлической трубы с помощью электромагнитного импульса. В данной работе представлен численный метод, основанный на уравнениях Максвелла. Результаты соответствуют результатам аналогичного исследования процесса обжига трубы давлением многвитковой электромагнитной катушки.

2. Максимальное магнитное давление  $p_{max}$  составляет 210 МПа и находится в зоне элемента А (см. рис. 10). Идеальный зазор между матрицей и

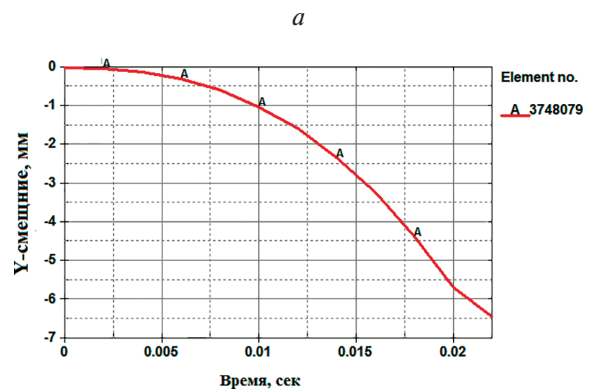
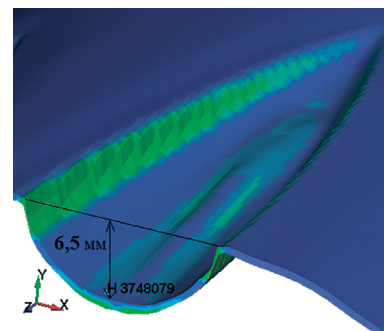
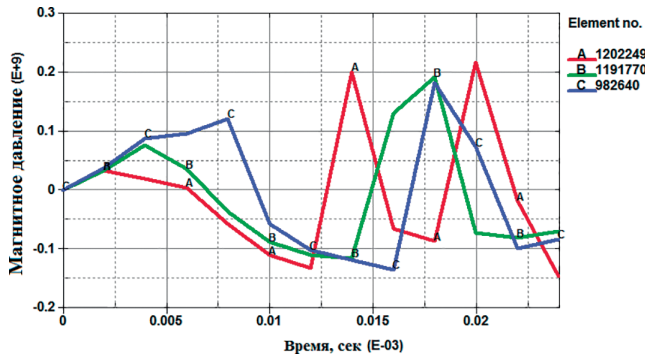
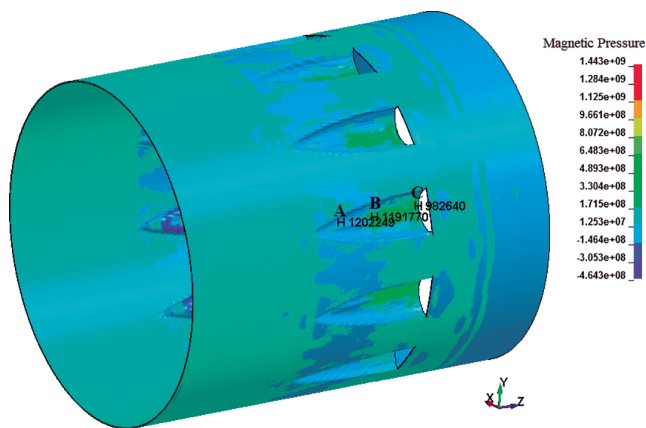


Рис. 9. Зависимость *Y*-смещения в краевой зоне элемента (*a*) от времени (*б*)



а



б

Рис. 10. Магнитное давление вдоль трубчатой заготовки: а – график кривых магнитного давления в зависимости от времени; б – распределение магнитного давления на трубчатой заготовке с жалюзи

алюминиевой трубой для достижения равномерного распределения деформации должен быть  $\leq 1$  мм. В данной работе численные и аналитические результаты показывают почти одинаковое значение силы Лоренца в рабочей зоне формирующей катушки, где максимальное напряжение по Мизесу составляет 300 МПа. Это позволяет утверждать, что наша модель правильно отображает параметры катушки и заготовки.

3. Важно понимать влияние конструкции катушки на деформацию заготовки в процессе электромагнитного обжима трубы. При увеличении количества витков деформация увеличивается. Увеличение количества витков увеличивает осевую длину катушки и, таким образом, увеличивает зону деформации на трубе. Такие параметры, как скорость, эффективная пластическая деформация и смещение, вычисляются с использованием метода конечных элементов. Было обнаружено, что значение этих параметров увеличивается при увеличении числа оборотов до восьми.

4. В отличие от других авторов (В.А. Глушенкова, И.А. Беляевой), нами предложены две операции – формирование и резание одновременно – и смоделирован сложной геометрии патрубков с 12 элементами жалюзи, изготовленный обжимом давлением импульсного магнитного поля, благодаря чему можно без лишних затрат материала и времени прогнозировать необходимое магнитное давление для формирования 12 жалюзи без дефектов. Авторы подчёркивают, что настоящая модель показала возможность повышения точности изготовления деталей в 1,5–2 раза в режимах соударения с формирующей матрицей.

**Список источников**

1. Хаустов В.М. Индуктор для деформирования трубчатой оболочки импульсами магнитного поля // Динамика систем, механизмов и машин. 2004. № 1. С. 144–146.
2. Лай Д.З. Управление формой импульса давления при электромагнитной штамповке // Автомобиле- и тракторостроение в России. Приоритеты развития и подготовка кадров: Сборник 77-й Международной научно-технической конференции ААИ (27–28 марта 2012; Москва). М.: МГТУ МАМИ, 2012. Книга 6. С. 145–148.
3. Шишкин А.А. Методы предотвращения потери устойчивости при обжиге тонкостенных труб // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением: Сборник трудов к 70-летию кафедры «Технология производства летательных аппаратов». М.: МАТИ, 2010. С. 43–44.
4. Глушенков В.А., Карпунин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: Монография. – Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. – 208 с.
5. Петров М.А., Матвеев А.Г., Петров П.А., Сапрыкин Б.Ю. Расчет и анализ процессов объемной штамповки с вращающимся инструментом при помощи конечно-элементного моделирования // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 226–244. DOI: 10.34759/vst-2022-1-226-244
6. Свирицкий Ю.А., Баутин А.А., Лукьянчук А.А., Басов В.Н. Приближенный метод решения упругопластической задачи // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 61–70. DOI: 10.34759/vst-2020-2-61-70
7. Яковлев С.П., Кухарь В.Д. Штамповка анизотропных заготовок. – М.: Машиностроение, 1986. – 133 с.
8. Щеглов Б.А. Пластическое формообразование тонкостенных труб путем локального динамического воздействия // Машиноведение. 1978. № 1. С. 72–79.
9. Самохвалов В.Н. Разработка теории и практических основ процессов штамповки тонкостенных деталей давлением импульсных магнитных полей без применения жесткого формообразующего инструмента: Дисс. докт. техн. наук. – М., 1996. – 284 с.



10. Талалаев А.К., Яковлев С.П., Кухарь В.Д. и др. Магнитно-импульсная штамповка полых цилиндрических заготовок. – Тула: Репроникс Лтд, 1998. – 238 с.
11. Кухарь В.Д., Орлов А.А., Киреева А.Е. Математическая модель электромеханических процессов в индукторе для магнитно-импульсной обработки // Научные основы решения проблем сельскохозяйственного машиностроения: сборник научных трудов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. С. 64–68.
12. Пальчун Е.Н., Проскураков Н.Е., Архангельская Н.Н. Моделирование процесса обжима импульсным магнитным полем с использованием теории подобия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2008. № 3. С. 205–210.
13. Попов Ю.А. Некоторые особенности расчета процессов, использующих силовое воздействие импульсного магнитного поля // Электрофизические процессы при импульсном разряде: Сборник статей. Чебоксары: ЧГУ, 1977. Вып. 4. С. 84–104.
14. Župan T., Štih Ž., Trkulja B. Fast and precise method for inductance calculation of coaxial circular coils with rectangular cross section using the one-dimensional integration of elementary functions applicable to superconducting magnets // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2014. Vol. 24. No. 2, pp. 81–89. DOI: 10.1109/TASC.2014.2301765
15. 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.
16. L'Epplattenier P., Ashcraft C., Ulaca I. An MPP version of the Electromagnetism module in LS-DYNA for 3D Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulation // 4<sup>th</sup> International Conference on High Speed Forming (9-10 March 2010; Columbus, Ohio, USA). DOI: 10.17877/DE290R-8665
17. Yu H.P., Li F.Z., Li F.C.F. Numerical simulation of coupled fields of electromagnetic forming for tube-compression based on FEM // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2006. Vol. 42. No. 7, pp. 231–234. DOI: 10.3901/JME.2006.07.231
18. Yu H.P., Li C.F., Zhao Z.H. et al. Magnetic pressure in electromagnetic aluminum tube-compression forming // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2003. Vol. 13 (special 1), pp. 165–169.
19. Yang D.Y., Jung D.W., Song I.S. et al. Comparative investigation into implicit, explicit and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming processes // Journal of Materials Processing Technology. 1995. Vol. 50, pp. 39–53.
20. L'Epplattenier P., Cook G., Ashcraft C. et al. Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic Simulations // 9<sup>th</sup> International LS-DYNA Users conference (2005; Dearborn, Michigan, USA).
21. Ren Z., Razeq A. New Technique for Solving Three-Dimensional Multiply connected Eddy Current Problem // IEE Proceedings A Science Measurement and Technology. 1990. Vol. 137. No 3, pp. 135-140.
22. Ахмед Солиман М.Э. Формообразование выпуклых рифтовых элементов при раздаче трубы давлением импульсного магнитного поля // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2022. № 2. С. 20–26.

## References

1. Khaustov V.M. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2004, no. 1, pp. 144-146.
2. Lai D.Z. *Materialy 77 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii AAI "Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii. Prioritety razvitiya i podgotovka kadrov" (27–28 March 2012; Moscow)*. Moscow, MGTU MAMI, 2012. Book 6, pp. 145-148.
3. Shishkin A.A. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. Sbornik trudov*. Moscow, MATI, 2010, pp. 43–44.
4. Glushchenkov V.A., Karpukhin V.F. *Tekhnologiya magnitno-impul'snoi obrabotki materialov* (Technology of magnetic-pulse processing of materials). Samara, Izdatel'skii dom "Fedorov", 2014, 208 p.
5. Petrov M.A., Matveev A.G., Petrov P.A., Saprykin B.Y. Computation and analyzing bulk forming processes with a rotating tool using FE simulation. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 226-244. DOI: 10.34759/vst-2022-1-226-244
6. Svirskiy Y.A., Bautin A.A., Luk'yanchuk A.A., Basov V.N. Approximate method for local elastic-plastic problems solving. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 2, pp. 61-70. DOI: 10.34759/vst-2020-2-61-70
7. Yakovlev S.P., Kukhar' V.D. *Shtampovka anizotropnykh zagotovok* (Stamping of anisotropic blanks), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 133 p.
8. Shcheglov B.A. *Mashinovedenie*, 1978, no. 1, pp. 72–79.
9. Samokhvalov V.N. *Razrabotka teorii i prakticheskikh osnov protsessov shtampovki tonkostennykh detalei davleniem impul'snykh magnitnykh polei bez primeneniya zhestkogo formoobrazuyushchego instrumenta* (Development of the theory and practical foundations of the processes of stamping thin-walled parts by pressure of pulsed magnetic fields without the use of a rigid forming tool). PhD Thesis. Moscow, MGAI (MAI), 1996, 284 p.
10. Talalaev A.K., Yakovlev S.P., Kukhar' V.D. et al. *Magnitno-impul'snaya shtampovka polykh tsilindricheskikh zagotovok* (Magnetic-pulse stamping of hollow cylindrical blanks.). Tuла, Reproniks Ltd, 1998, 238 p.

11. Kukhar' V.D., Orlov A.A., Kireeva A.E. *Nauchnye osnovy resheniya problem sel'skokhozyaistvennogo mashinostroyeniya. Sbornik nauchnykh trudov*. Tula, TulGU, 2004, pp. 64–68.
12. Pal'chun E.N., Proskuryakov N.E., Arkhangel'skaya N.N. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2008, no. 3, pp. 205–210.
13. Popov Yu.A. *Elektrofizicheskie protsessy pri impul'snom razryade. Sbornik statei* (Electrophysical processes in a pulsed discharge), Cheboksary, ChGU, 1977. Issue 4, pp. 84–104.
14. Župan T., Štih Ž., Trkulja B. Fast and precise method for inductance calculation of coaxial circular coils with rectangular cross section using the one-dimensional integration of elementary functions applicable to superconducting magnets. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, vol. 24, no. 2, pp. 81–89. DOI: 10.1109/TASC.2014.2301765
15. Akhmed Soliman M.E., Kurlaev N.V. *Kuznechno-shtampovoechnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2023, no. 2, pp. 16–20.
16. L'Eplattenier P., Ashcraft C., Ulaca I. An MPP version of the Electromagnetism module in LS-DYNA for 3D Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulation. *4<sup>th</sup> International Conference on High Speed Forming (9-10 March 2010; Columbus, Ohio, USA)*. DOI: 10.17877/DE290R-8665
17. Yu H.P., Li F.Z., Li F.C.F. Numerical simulation of coupled fields of electromagnetic forming for tube-compression based on FEM. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, vol. 42, no. 7, pp. 231–234. DOI: 10.3901/JME.2006.07.231
18. Yu H.P., Li C.F., Zhao Z.H. et al. Magnetic pressure in electromagnetic aluminum tube-compression forming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2003, vol. 13 (special 1), pp. 165–169.
19. Yang D.Y., Jung D.W., Song I.S. et al. Comparative investigation into implicit, explicit and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, vol. 50, pp. 39–53.
20. L'Eplattenier P., Cook G., Ashcraft C. et al. Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic Simulations. *9<sup>th</sup> International LS-DYNA Users conference (2005; Dearborn, Michigan, USA)*.
21. Ren Z., Razek A. New Technique for Solving Three-Dimensional Multiply connected Eddy Current Problem. *IEE Proceedings A Science Measurement and Technology*, 1990, vol. 137, no 3, pp. 135-140.
22. Akhmed Soliman M.E. *Kuznechno-shtampovoechnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2022, no. 2, pp. 20–26.

Статья поступила в редакцию 27.05.2024; одобрена после рецензирования 24.07.2024; принята к публикации 12.08.2024.  
The article was submitted on 27.05.2024; approved after reviewing on 24.07.2024; accepted for publication on 12.08.2024.