

Научная статья

УДК 621.791.12: 537.634

URL: : <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185136>

EDN: <https://www.elibrary.ru/MUIOOV>



Численное проектирование формирователя поля для магнитно-импульсной сварки листовых деталей летательных аппаратов

Мохамед Шериф Эль Сайед Ахмед Солиман¹, Дмитрий Анатольевич Чинахов²,
Иван Анатольевич Батаев³, Николай Васильевич Курлаев⁴✉

^{1, 2, 3, 4} Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), Новосибирск,
Российская Федерация

¹ axmed_soliman@corp.nstu.ru

² chinakhov@corp.nstu.ru

³ i.bataev@corp.nstu.ru

⁴ kurlaev@corp.nstu.ru✉

Аннотация. Конструкция формирователя поля играет существенную роль в процессе магнитно-импульсной сварки (МИС) листовых деталей летательных аппаратов. Он должен быть спроектирован таким образом, чтобы магнитное поле максимально было сосредоточено в активной рабочей зоне. Одновременно важно позаботиться о механической прочности формирователя поля (ФП), чтобы напряжение Фон-Мизеса, действующее на него, всегда было ниже прочности материала, используемого для его изготовления. При МИС металлические заготовки прижимаются и формируются давлением, создаваемым с использованием интенсивного нестационарного магнитного поля, путем пропускания импульса электрического тока через катушку в цепи импульсного питания. Наведенные вихревые токи в заготовке создают магнитное поле, направление которого противоположно направлению исходного магнитного поля, это приводит к взаимному отталкиванию заготовок.

В процессе деформации две пластины постепенно сближаются в течение короткого промежутка времени, высокие скорости, давление и «эффект гребней» обеспечивают сварку в зоне сцепления двух полос. Вследствие высоких скоростей соударения и давления в окрестности линии контакта реализуются условия, обеспечивающие интенсивное совместное пластическое деформирование свариваемых металлов, приводящее к образованию физического контакта, активации поверхностей и формированию соединения.

Ключевые слова: сила Лоренца, магнитно-импульсная сварка, конечно-элементный анализ, одновитковая катушка, формирователь поля, скин-эффект, численная модель SPH, окно сварки

Для цитирования: Ахмед Солиман М.Э., Чинахов Д.А., Батаев И.А., Курлаев Н.В. Численное проектирование формирователя поля для магнитно-импульсной сварки листовых деталей летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 2. С. 204–213. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185136>

Original article

Numerical Design of a Field Shaper for Magnetic Pulse Welding of Aircraft Sheet Parts

Mohamed Sherif El Sayed Ahmed Soliman¹, Dmitrii A. Chinakhov², Ivan A. Bataev³, Nikolai V. Kurlaev⁴✉

^{1, 2, 3, 4} Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, Russian Federation

¹ axmed_soliman@corp.nstu.ru

² chinakhov@corp.nstu.ru

³ i.bataev@corp.nstu.ru

⁴ kurlaev@corp.nstu.ru✉

Abstract

The objective of this work is to conduct a numerical study on the effective geometry of the field shaper FS in order to obtain the most suitable and most effective working area for the magnetic pressure acting on the workpiece. The novelty of this study is to simulate the magnetic pulse welding of MPW using the LS-DYNA software by the finite element method (FEM), which allows using both finite and boundary elements to solve thermo-mechanical problems during electromagnetic forming, which is confirmed by the results of the smoothed particle method (SPH). One of the most important conditions of MPW is the formation of a jet at the collision point. To perform welding, the presence of a jet is necessary. This is the main condition for welding. Highly localized pressures created at the collision point propagate at the speed of sound. Since the collision occurs at a subsonic speed, pressures are created on the immediately approaching adjacent surfaces, sufficient to chip off a thin layer of metal from each surface and eject it as a jet. In practice, surface contaminants, oxides and impurities are removed in the jet. For bonding to occur, the two surfaces must be brought close enough to be within the range of interatomic attractive forces.

The force between two atoms consists of attractive and repulsive forces, and at a certain equilibrium distance these two forces are in equilibrium, i.e. the potential energy is at its minimum. For the two surfaces to adhere, they must be brought together within this equilibrium distance, and this requires that the surfaces be free of any oxide or other contaminant films. Theoretically, at any oblique angle of impact, if the velocity of the impact point remains subsonic, jet atomization will occur. In practice, however, a minimum angle is required to satisfy the pressure requirements, i.e. the pressure must be sufficient to exceed the dynamic elastic limit of the material to ensure deformation of the metal surfaces into a jet. To obtain a high-quality connection, it is necessary that the impact speed V_c and the contact point speed V_k are within a certain range of values in the welding window.

Keywords: Lorentz force, magnetic pulse welding MPW, finite element analysis, single-turn coil, field shaper FS, skin effect, numerical SPH model, welding window

For citation: Ahmed Soliman M.E., Chinakhov D.A., Bataev I.A., Kurlaev N.V. Numerical Design of a Field Shaper for Magnetic Pulse Welding of Aircraft Sheet Parts. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(2):204–213. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185136>

List of Figures

Fig. 1. Design of the U-shaped inductor of the field shaper: 1 – inductor; 2 – field shaper;

3 – upper deformable sheet blank; 4 – lower deformable sheet blank

Fig. 2. Scheme of electromagnetic impact on sheet welding through a field former: 1 – forming coil; 2 – field former;

3 – two workpiece guides; 4 – contact (seam) length; 5 – working height

Fig. 3. Change of the current pulse in the coil

Fig. 4. Voltage change on the coil

Fig. 5. The change of the Lorentz force on the coordinate (x, y, z) (a); and the effect of the Lorentz force in the area of coordinates X (b)

Fig. 6. Equivalent stress according to von Mises

Fig. 7. Plastic deformation on the workpiece

Fig. 8. Induced magnetic field during the 1st current peak

Fig. 9. The impact velocity V_c at which the “ridge effect” appears

Fig. 10. Geometry of the used numerical model SPH

Fig. 11. Morphology of the wavy surface and the formation of “hooks”

Fig. 12. Morphology of the wavy surface and the phenomenon of jet formation during oblique impact welding of titanium and copper plates

Fig. 13. Distribution of pressure (a) and temperature (b) in the “hook” formation zone

Fig. 14. Weldability window

Введение

Магнитно-импульсная сварка (МИС) — это процесс соединения однородных и разнородных металлов в твердом состоянии. Высокоскоростное воздействие во время процесса сварки вызывает различные межфазные явления. Сочетание высокоскоростного столкновения, джоулевого нагрева за счет вихревого тока и пластического рассеивания тепла приводит к заметному нагреву заготовки. Нагрев от пластической обработки и энергии столкновения могут быть особенно значительными вблизи границы раздела по сравнению с другими участками заготовки. Джоулев нагрев за счет вихревых токов воздействует на всю заготовку. Наблюдается резкое повышение температуры в начале формирования сварного шва вследствие диссипации пластической работы при соударении. Для исследования нагрева, вызванного комбинированным джоулевым нагревом и пластической диссипацией, было проведено 3D-моделирование электромагнитно-механо-тепловых процессов. Цель данной работы — численное исследование геометрии ФП для выбора наиболее подходящей рабочей зоны максимально эффективного воздействия магнитного давления на обрабатываемую деталь.

Для исследования процесса сварки используется практический пример МИС. В состав сварочной системы входят одновитковая катушка и формирователь поля. Новизна данного исследования заключается в моделировании МИС с использованием POLS-DYNA методом конечных элементов (МКЭ). Это позволяет использовать как конечные, так и граничные элементы для решения термомеханических задач во время электромагнитной формовки, что подтверждено результатами, полученными методом сглаженных частиц (SPH). Процесс МИС заключается в высокоскоростном столкновении и пластической деформации, что позволяет сваривать металлы в твердом состоянии без образования расплавленной сварочной ванны, которая возникает при обычных сварочных процессах.

Численное решение задачи о МИС с жесткой пластиной рассматривали в упругопластической постановке. Модель Прандтля—Рейса использовали для решения задачи о соударении упругопластических прямоугольников в геометрически линейной постановке с расчетом контактного сцепления типа «узел в узел». При моделировании контактного

взаимодействия необходимо иметь представление о характере и параметрах «трения — сцепления» соударяющихся поверхностей. Была выбрана модель кулонова трения, в которую с учетом критерия сварки введена зависимость от уровня пластической деформации. Такой критерий не противоречит известному «струйному» критерию сварки, поскольку образование «очищающей» кумулятивной струи возможно только в случае развитых пластических течений в окрестности фронта соударения свариваемых пластин.

От правильного выбора угла соударения зависят условия волнообразования и формирования поверхностной струи, очищающей свариваемые поверхности, характер пластической деформации в зоне контакта. Угол соударения γ влияет на скорость движения точки контакта V_k , от которой также зависит характер пластической деформации металлов соударяющихся поверхностей. Для определения зависимости скорости движения точки контакта от скорости соударения V_c и угла соударения в некоторый момент времени можно записать соотношение: $V_k = V_c / \sin \gamma$.

Принцип и моделирование магнитно-импульсной сварки

Одним из простейших способов получения информации об электромагнитных процессах, происходящих во время МИС, является определение формы тока в магнитной катушке. Форма волны тока является результатом разряда конденсатора через резистивные и индуктивные элементы сварочной системы (катушки, формирователя поля и заготовки). В случае недеформирующейся заготовки ток колеблется по закону затухания. Однако из-за изменения индуктивности деформирующихся подвижных заготовок и изменения взаимной индуктивности между катушкой и заготовками при их движении формы тока через катушку сильно различаются. Изменение этой формы можно использовать для оценки качества МИС. Предложен новый формирователь поля с оптимизатором формы для получения эффективного распределения магнитного давления внутри рабочей секции формирователя поля (рис. 1).

В качестве источника питания используется батарея заряженных конденсаторов. Внезапный разряд синусоидального тока создает магнитное

EM Field Shaper A. Soliman

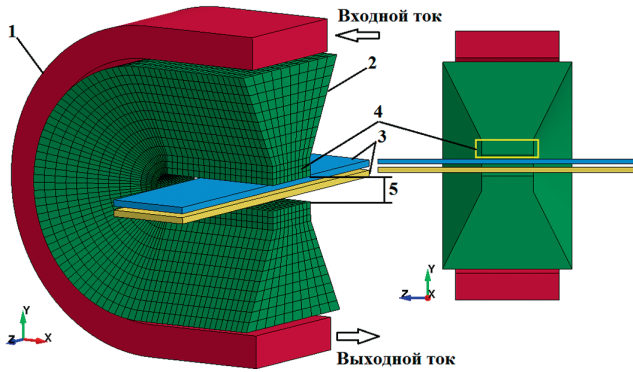


Рис. 1. Схема электромагнитного воздействия на листовые заготовки через формирователь поля: 1 – формирующая катушка; 2 – формирователь поля; 3 – две подвижные заготовки; 4 – контакт (шов); 5 – высота рабочей зоны

поле в катушке. В результате в формирователе поля возникает вторичный вихревой ток, создающий вторичное магнитное поле. Это поле генерирует третичный ток во внешней трубе и, в свою очередь, третичное магнитное поле. Сила Лоренца, создаваемая этим магнитным полем, вызывает деформацию заготовки. Уравнение Максвелла описывает электромагнитный процесс [1–6]:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{-d\vec{B}}{dt}; \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \varepsilon \frac{-d\vec{E}}{dt}; \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0; \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}. \quad (4)$$

Из закона Ома имеем:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s. \quad (5)$$

С использованием уравнения Максвелла объемная сила, действующая на заготовку, – сила Лоренца $\vec{F}$ записывается как [7–10]

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} = \left(\vec{\nabla} \times \frac{\vec{B}}{\mu_m} \right) \times \vec{B}, \quad (6)$$

где μ_m – магнитная проницаемость материала. Эффективное давление, действующее на поверхность подвижных заготовок, определяется как интеграл от объемной силы по толщине d заготовки. Более того, учитывая, что из-за скин-эффекта пренебрегают проникающим магнитным полем, магнитное давление можно упростить [11, 12]:

$$p = \int_0^d \vec{F} \cdot d\vec{r} = \frac{1}{2} \mu_m H_{\text{зазор}}^2, \quad (7)$$

где $H_{\text{зазор}}$ – напряженность магнитного поля в зазоре.

Численное моделирование и методы решения

Анализ процесса МИС методом конечных элементов проводился с использованием LS-DYNA. Эта модель электромагнетизма (ЭМ) способна улавливать влияние магнитных полей на деформацию заготовок вблизи катушки. Медная катушка 1 (см. рис. 1) имеет полукруглую форму с диаметром 42 мм. Она состоит из одного поперечного витка сечением 20×5 мм для получения равномерного распределения плотности тока по окружности. Коаксиальный латунный формирователь поля 2 с высотой рабочей зоны 54 мм помещается внутрь катушки для фокусировки тока и силы, возникающей в результате воздействия электромагнитного поля. Когда первичный ток протекает через узел катушки, индуцируется вторичный ток, который течет внутри, что приводит к созданию концентрированного электромагнитного поля и давления, действующего на титановую CP-Ti и медную Cu110 заготовки (3 и 4) с толщиной по 1 мм, шириной 13 мм и длиной контакта (шва) 4 с формирователем поля, составляющей 10 мм. МИС основана на высокоскоростной операции столкновения подвижной заготовки с электромагнитным приводом, за которой следует косое столкновение с подвижным соединением титановой и медной заготовок. Значения тока (рис. 2) получены в результате моделирования во время процесса. Он измеряется с помощью катушки Роговского с широкой полосой пропускания от 100 Гц до 5 МГц. Пик тока составляет 1025 кА при напряжении 3,2 кВ (рис. 3).

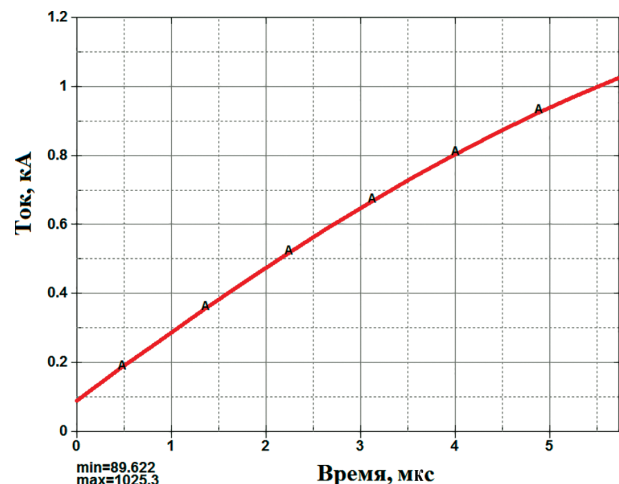


Рис. 2. Изменение импульса тока в катушке

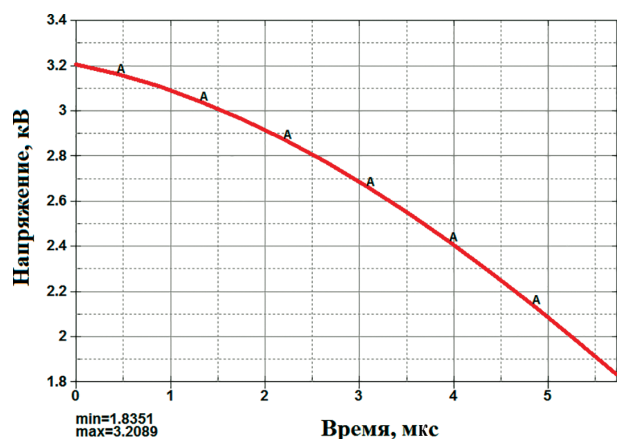


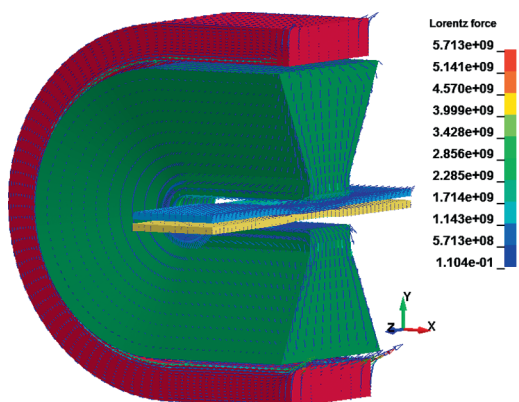
Рис. 3. Изменение напряжения на катушке

Пространственное распределение компонента силы Лоренца вдоль осей X и Y представлено на рис. 4,а. Координата Z силы Лоренца пренебрежимо мала, за исключением окрестности щели. Можно отметить, что силы Лоренца в области координат X являются высокими по сравнению с другими областями формирователя поля и составляют $6,9 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^3$ (рис. 4,б). Силы Лоренца изменяются из-за того, что иногда детали испытывают неоднородные деформации, особенно когда они подвергаются большой пластической деформации.

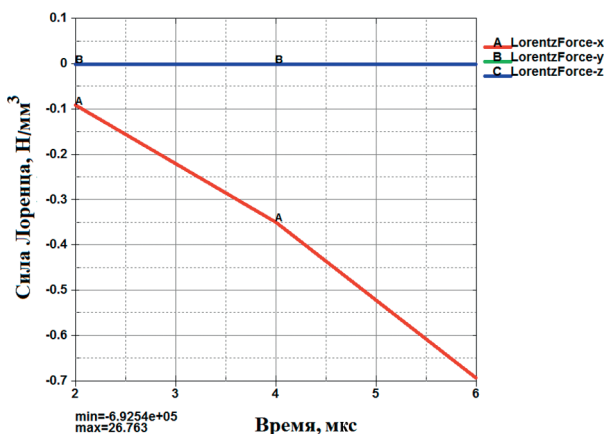
Эквивалентное напряжение по Мизесу составляет 300 МПа и находится в центральной зоне шва сварки (рис. 5).

Максимальная эффективная пластическая деформация составляет 0,49 и находится в центральной зоне шва сварки (рис. 6).

Магнитная индукция во время первого пика тока составляет 45 Тл (рис. 7). Видно, что магнитное поле проходит через формирователь поля. Можно наблюдать индукцию магнитного поля в катушке, которая, в свою очередь, индуцирует вихревые токи



а



б

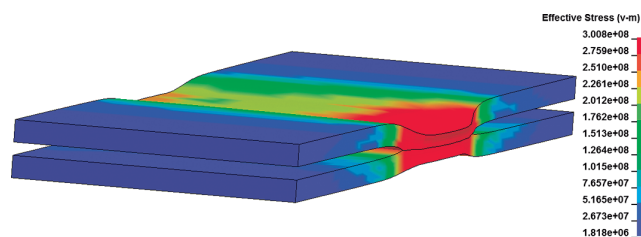
Рис. 4. Изменение силы Лоренца по координатам X , Y , Z (а) и действие силы Лоренца в области координат X (б)

Рис. 5. Эквивалентное напряжение по Мизесу

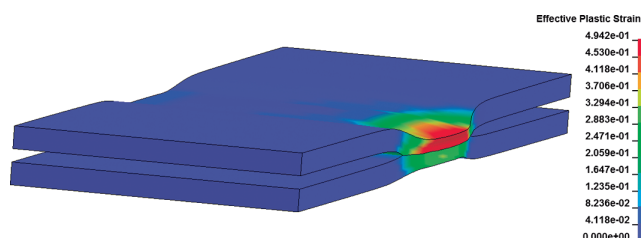


Рис. 6. Пластическая деформация на заготовке

в формирователе поля, которые будут индуцировать вихревые токи и, следовательно, магнитное поле в пластинах.

По результатам анализа магнитного поля граничные условия могут быть установлены следующим образом: в декартовой системе координат $\vec{B}$ (магнитная индукция) перпендикулярна оси x при $y = 0$.

Состояние ударной сварки

При скорости соударения 600 м/с эффект перемешивания материала в зоне контакта проявляется сильнее, что определяет волнообразную морфологию поверхности раздела. Можно отметить, что волны сжатия, возникающие в точке столкновения, будут отражаться на свободной поверхности и что взаимодействие происходит между отраженными волнами разрежения и волнами сжатия. Это при-

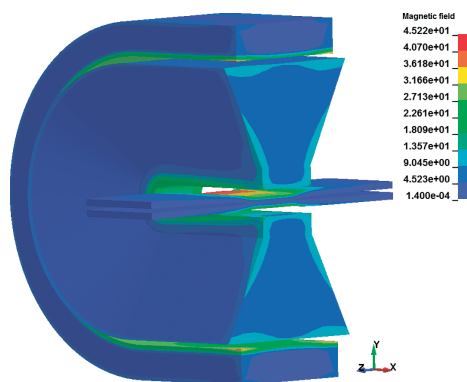


Рис. 7. Наведенное магнитное поле во время 1-го пика тока

водит к периодической деформации свободной поверхности метаеых пластин (до точки столкновения) и проявляется после сварки поверхностей как волновое образование «эффект гребней» (рис. 8).

Из-за недостатка метода конечных элементов в показе межфазной волны между пластинами в 3D при сварке, авторами было решено использовать двумерное численное моделирование для изучения ее морфологии с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц SPH (Smoothed-particle hydrodynamics) и прогнозирования ключевого параметра процесса сварки с высокой скоростью удара для комбинации материалов из титановых и медных пластин (рис. 9). Размер частиц оказывает значительное влияние на способность улавливать морфологию межфазной поверхности и явление струйного распыления за разумное время вычислений. Начальная температура для обоих листов была задана комнатной, а начальная вертикальная V_c скорость соударения пластин была установлена равной ~ 600 м/с, угол косоого соударения $\gamma = 20^\circ$.

Модель Джонсона–Кука подходит для описания соотношений напряжений и деформаций металлических материалов в условиях большой деформации, высокой скорости деформации и высокой температуры. Благодаря простой форме она получила широкое распространение вскоре после того, как была предложена [13–15]:

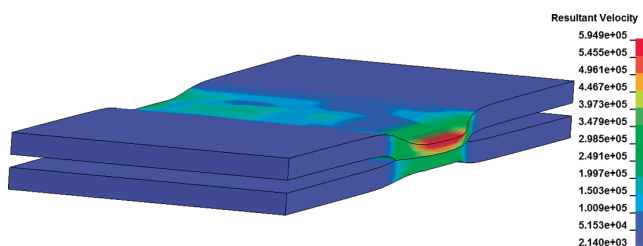


Рис. 8. Скорость соударения V_c , при которой появляется «эффект гребней»

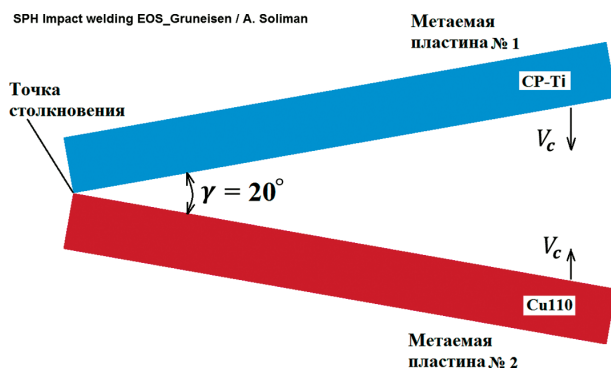


Рис. 9. Геометрия используемой численной модели SPH

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T_m^*), \quad (8)$$

где A – предел текучести при комнатной температуре и опорной скорости деформации; B – коэффициент деформационного упрочнения (предэкспоненциальный множитель); n – коэффициент деформационного упрочнения; ϵ – эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ – безразмерная скорость деформации ($\dot{\epsilon}_0$ обычно принимается равной 1 с^{-1}); C и m – константы материала, связанные с упрочнением при деформации и термическим размягчением.

В уравнении (8) выражение в первой паре скобок дает зависимость от деформации, выражение во второй относится к мгновенной чувствительности к скорости деформации; в третьей представлена температурная зависимость напряжения; T^* – безразмерная температура, которая определяется как

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}, \quad (9)$$

где T_r – комнатная температура; T_m – температура плавления материала.

Давление в точке контакта, которое заложено в тензоре напряжений, вычислялось по уравнению состояния Грюнайзена. Увеличение скорости соударения приводит к лавинообразному увеличению высоты волны гребней (рис. 10), что способствует



Рис. 10. Морфология волнистой поверхности и формирование гребней



Рис. 11. Морфология волнистой поверхности и явление образования струи при косой ударной сварке титановой и медной пластин

лучшей свариваемости материалов, но их распределение и высота должны быть одинаковыми для получения равномерного шва.

В соответствии с [16–20] кумулятивная струя должна возникать при любых значениях угла и скорости удара. Когда скорость точки контакта V_k меньше скорости звука в металле, ударные волны движутся вперед и возможно образование струи. Волновой шов, длина и амплитуда волны связаны как с толщиной метаемой пластины δ , так и со скоростью соударения V_c (рис. 11).

На рис. 12,а показано очень высокое давление – до 12 ГПа, существующее в устье фронта столкновения.

На рис. 12,б показано распределение температуры на границе раздела, температура расплавленного материала достигает 2000 К, что является красной границей графика интерференции. Предполагается, что соединение представляет собой сварной шов в твердом состоянии.

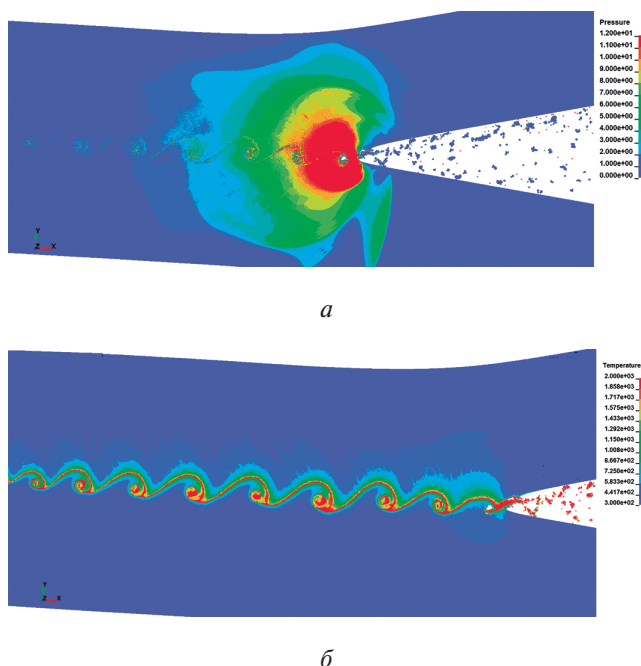


Рис. 12. Распределение давления (а) и температуры (б) в зоне образования «гребней»

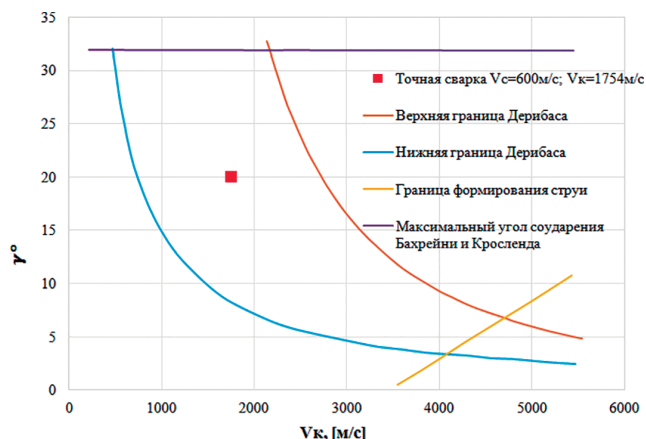


Рис. 13. Окно сварки

На рис. 13 представлены координаты скорости точки контакта V_k , угла соударения γ и области, ограниченной несколькими линиями. Условия воздействия, соответствующие данной области, являются оптимальными для получения высококачественного соединения. Верхняя, нижняя, левая и правая границы, переход, максимальные и минимальные углы изгиба и критические углы струйной подачи являются прямыми и изогнутыми границами, которые составляют окно сварки между двумя параметрами. Виттман и Дерибас создали окно взрывной сварки, где скорость точки контакта V_k откладывается по оси абсцисс, а динамический угол соударения γ откладывается по оси ординат. Нижняя граница особенно важна, поскольку она обеспечивает минимальную скорость соударения. Можно определить каждую из границ с помощью численного моделирования. Чтобы определить нижний предел сварки по Дерибасу, согласно Биркхоффу, Уолшу, Коэуну и Хольцману, надо учитывать, что струя всегда образуется при дозвуковых скоростях точки контакта.

Выводы

1. Трехмерное совместное электромагнитно-структурное моделирование процесса МИС демонстрирует большие возможности. В частности, метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ) в модуле ЭМ LS-DYNA идеально подходят благодаря таким преимуществам, как отсутствие воздушной (изоляционной) сетки. Расчеты показывают, что необходима оптимизация геометрии соединения, чтобы избежать областей пиков пластической деформации, которые являются причиной возникновения трещин.

2. Проведено численное моделирование электромагнитной сварки с формирователем поля. Как показали результаты, формирователь поля способствует явному увеличению и равномерному

распределению магнитного поля. Моделирование помогает эффективно прогнозировать оптимальные параметры процесса для выполнения электромагнитной сварки с использованием катушек различной геометрии и комбинаций материалов.

3. Была разработана катушка с соответствующим формирователем поля, чтобы обеспечить хорошую функциональность и долговечность. При проектировании использовались численные расчеты. Показано, что с точки зрения функциональности и механической нагрузки наиболее важными являются внутренняя форма формирователя поля в направлении силы. Кроме того, исследования показали, что для соответствующей конструкции инструмента рекомендуется один поперечный виток сечением 20×5 мм.

4. Была проведена работа по проектированию подходящего формирователя поля с учетом эффективной высоты рабочей зоны в качестве переменной. Было обнаружено, что слишком большое уменьшение эффективной высоты может сократить срок службы формирователя поля, поэтому правильный выбор эффективной высоты обязателен при проектировании формирователя поля. Согласно результатам исследования она составляет 4 мм.

5. Пиковые значения магнитной индукции, силы Лоренца и эффективной пластической деформации были получены с помощью формирователя поля с эффективной высотой рабочей зоны 4 мм и составили 45 Тл; $6,9 \cdot 10^5$ Н/мм³ и 0,49 соответственно при разрядном напряжении 3,2 кВ. Кроме того, напряжение Фон-Мизеса, действующее на формирователь поля, должно быть меньше предела текучести, чтобы продлить срок службы инструмента.

6. Формирователь поля равномерно распределяет магнитное поле по желаемой рабочей области и, следовательно, увеличивает срок службы катушки. Кроме того, расположение заготовок внутри формирователя поля помогает добиться максимального использования входной энергии, и это можно легко оценить с помощью моделирования. Кроме того, можно осуществить 3D-моделирование КЭ с использованием подхода с закрытой связью, чтобы спрогнозировать окно свариваемости. Диапазон частот тока можно оптимизировать, оптимизировав технологические параметры (напряжение, емкость и т. д.) под конкретные технические условия.

Список источников

1. *Bahmani M.A., Niayesh K., Karimi A.* 3D Simulation of magnetic field distribution in electromagnetic forming systems with field-shaper // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. No. 5, pp. 2295–2301. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.05.024

2. *Yan Z., Xiao A., Cui X., et al.* Magnetic pulse welding of aluminum to steel tubes using a field-shaper with multiple seams // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 65. No. 1–4, pp. 214–227. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.03.037
3. *Soni M., Ahmed M., Panthi S.K., et al.* Analysis of field shaper materials on the deformation behavior of (AA6061) tube in electromagnetic forming process through simulation and experiments // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 82. No. 6, pp. 23–35. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.07.056
4. *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>
5. *Ахмед Солиман М.Э., Курлаев Н.В., Шайдуров 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/eng/publications.php?ID=183585>
6. *Chen Y., Yang Z., Peng W., et al.* Experimental investigation and optimization on field shaper structure parameters in magnetic pulse welding // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2021. Vol. 235. No. 13, pp. 2108–2117. DOI: 10.1177/09544054211014846
7. *Maloberti O., Mansouri O., Jouaffre D., et al.* Definition and calculation of single turn coils' electrical, magnetic and electro-mechanical parameters for pulsed magnetic technologies with the finite element method and experiments // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2019. Vol. 61. No. 4, pp. 605–632. DOI: 10.3233/JAE-180132
8. *Linnemann M., Scheffler C., Psyk V.* Numerically Assisted Design for Electromagnetically Driven Tools // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 47, pp. 1334–1338. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.254
9. *Rajak A.K., Kore S.D.* Application of electromagnetic forming in terminal crimping using different types of field shapers // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. Vol. 32. No. 9, pp. 4291–4297. DOI: 10.1007/s12206-018-0827-z
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. *Ахмед Солиман М.Э., Курлаев Н.В.* Исследование соединения алюминиевых труб и стержней различной геометрии электромагнитно-импульсной сваркой // *Вестник Московского авиационного института*. 2025. Т. 32. № 1. С. 202–213. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184463>

12. Ахмед Солиман М.Э. Численное исследование высокоскоростной сварки угловым ударом методом гидродинамики сглаженных частиц // Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. Т. 156. № 12. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-12-2405
13. Kuz'min E.V., Lysak V.I., Kuz'min S., et al. Effect of parameters of high-velocity collision on the structure and properties of joints upon explosive welding with simultaneous ultrasonication // *Physics of Metals and Metallography*. 2019. Vol. 120. No. 2, pp. 197–203. DOI: 10.1134/S0031918X1902011X
14. Gupta V., Lee T., Vivek A., et al. A robust process-structure model for predicting the joint interface structure in impact welding // *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 264. No. 4, pp. 107–118. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.047
15. Nassiri A., Zhang S., Lee T., et al. Numerical investigation of CP-Ti & Cu110 impact welding using smoothed particle hydrodynamics and arbitrary Lagrangian–Eulerian methods // *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. Vol. 28. No. 1. Part 3, pp. 558–564. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.04.032
16. Carvalho G.H.S.F.L., Galvão I., Mendes R., et al. Explosive welding of aluminum to stainless steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 262, pp. 340–349. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.06.042
17. Дудин А.А. Магнитно-импульсная сварка металлов. М.: Металлургия, 1979. 128 с.
18. Grignon F., Benson D.J., Vecchio K.S., et al. Explosive welding of aluminum to aluminum: Analysis, computations and experiments // *International Journal of Impact Engineering*. 2004. Vol. 30. No. 10, pp. 1333–1351. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.049
19. Bataev I.A., Lazurenko D.V., Tanaka S., et al. High cooling rates and metastable phases at the interfaces of explosively welded materials // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 135. No. 1, pp. 277–289. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.06.038
20. Emurlaeva Y.Y., Aleksandrova N.S., Bataev I.A. Weldability Window for High-Velocity Impact Welding of Al and Ti Plates Obtained by Numerical Simulation // *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 910. No. 5, pp. 544–550. DOI: 10.4028/p-i5kvr2

References

1. Bahmani MA, Niayesh K, Karimi A. 3D Simulation of magnetic field distribution in electromagnetic forming systems with field-shaper. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(5):2295–2301. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.05.024
2. Yan Z, Xiao A, Cui X, et al. Magnetic pulse welding of aluminum to steel tubes using a field-shaper with multiple seams. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;65(1–4):214–227. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.03.037
3. Soni M, Ahmed M, Panthi SK, et al. Analysis of field shaper materials on the deformation behavior of (AA6061) tube in electromagnetic forming process through simulation and experiments. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;82(6):23–35. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.07.056
4. Akhmed 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>
5. Ahmed Soliman ME, Kurlaev NV, Shaidurov SV. Manufacturing of a branch tube with blinds for air conditioning systems of aircraft by expansion pressure of pulsed magnetic field. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(3):65–74. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=183585>
6. Chen Y, Yang Z, Peng W, et al. Experimental investigation and optimization on field shaper structure parameters in magnetic pulse welding. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. *Journal of Engineering Manufacture*. 2021;235(13):2108–2117. DOI: 10.1177/09544054211014846
7. Maloberti O, Mansouri O, Jouaffre D, et al. Definition and calculation of single turn coils' electrical, magnetic and electro-mechanical parameters for pulsed magnetic technologies with the finite element method and experiments. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2019;61(4):605–632. DOI: 10.3233/JAE-180132
8. Linnemann M, Scheffler C, Psyk V. Numerically Assisted Design for Electromagnetically Driven Tools. *Procedia Manufacturing*. 2020;47:1334–1338. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.254
9. Rajak AK, Kore SD. Application of electromagnetic forming in terminal crimping using different types of field shapers. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018;32(9):4291–4297. DOI: 10.1007/s12206-018-0827-z
10. Ahmed Soliman ME. Investigation of deformation of aluminum alloy sheets during shaping of aircraft parts by pressure of a pulsed magnetic field. PhD thesis. Novosibirsk: Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS; 2022. 239 p. (In Russ.).
11. Ahmed Soliman ME, Kurlaev NV. The study of aluminum pipes and rods of various geometries jointing by electromagnetic pulse welding. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(1):202–213. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184463>
12. Ahmed Soliman ME. Numerical study of high-speed angular impact welding by smoothed particle hydrodynamics method. *Engineering journal: Science and innovation*. 2024;156(12). DOI: 10.18698/2308-6033-2024-12-2405
13. Kuz'min EV, Lysak VI, Kuz'min S, et al. Effect of parameters of high-velocity collision on the structure and properties of joints upon explosive welding with simultaneous ultrasonication. *Physics of Metals and Metallography*. 2019;120(2):197–203. DOI: 10.1134/S0031918X1902011X

14. Gupta V, Lee T, Vivek A, et al. A robust process-structure model for predicting the joint interface structure in impact welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;264(4):107–118. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.08.047
15. Nassiri A, Zhang S, Lee T, et al. Numerical investigation of CP-Ti & Cu110 impact welding using smoothed particle hydrodynamics and arbitrary Lagrangian–Eulerian methods. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;28(1):558–564. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.04.032
16. Carvalho GSFL, Galvão I, Mendes R, et al. Explosive welding of aluminum to stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;262:340–349. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.06.042
17. Dudin AA. *Magnetic pulse welding of metals*. Moscow: Metallurgiya; 1979. 128 p. (In Russ.).
18. Grignon F, Benson DJ, Vecchio KS, et al. Explosive welding of aluminum to aluminum: Analysis, computations and experiments. *International Journal of Impact Engineering*. 2004;30(10):1333–1351. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.049
19. Bataev I.A., Lazurenko D.V., Tanaka S, et al. High cooling rates and metastable phases at the interfaces of explosively welded materials. *Acta Materialia*. 2017;135(1):277–289. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.06.038
20. Emurlaeva YY, Aleksandrova NS, Bataev IA. Weldability Window for High-Velocity Impact Welding of Al and Ti Plates Obtained by Numerical Simulation. *Key Engineering Materials*. 2022;910(5):544–550. DOI: 10.4028/p-i5kvr2

Статья поступила в редакцию / Received 02.04.2025
 Одобрена после рецензирования / Revised 12.04.2025
 Принята к публикации / Accepted 19.04.2025