

Цымбалов Денис Сергеевич

старший преподаватель

Яценко Олег Вадимович

канд. техн. наук, доцент

Цымбалова Виктория Михайловна

магистрант

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

г. Ростов-на-Дону, Ростовская область

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ

***Аннотация:** авторами предложена и исследована информационная модель современного высокотехнологичного процесса – контактной магнитно-импульсной сварки. Модель основана на системе эволюционных дифференциальных уравнений, описывающих тепломассообмен в свариваемой заготовке. Компьютерные эксперименты подтвердили адекватность модели и ее пригодность для параметрической оптимизации этой сварочной технологии. Результаты исследований актуальны для машиностроения, в т. ч. аэрокосмических приложений.*

***Ключевые слова:** контактная магнитно-импульсная сварка, информационное моделирование, дифференциальные уравнения, вычислительный эксперимент.*

Введение

Бурное развитие сварочных производственных технологий и оборудования стимулируется потребностями наиболее технологичных отраслей промышленности: микро- и наноэлектроники, аэрокосмической сферы, автомобилестроения и др. [1; 2]. Физический процесс контактной магнитно-импульсной сварки (КМИС) основан на омическом нагреве и последующем механическом сдавливании контактной зоны интенсивным электромагнитным полем [1].

Физическая модель и технологическая схема процесса

Технология КМИС тонких металлических образцов (оболочек) схематизирована на рис. 1. Оборудование КМИС состоит из индуктора 1 (рис. 1), конденсаторно-коммутирующего блока (2) и матрицы с надлежащими формой и размерами (3). Заготовка представляет собой закольцованную тонкую пластину из цветного металла в форме изделия (4) с небольшим нахлестом (5) для обеспечения сварного соединения. Эта заготовка помещается между матрицей и индуктором, после чего через индуктор разряжают конденсаторную батарею. Индуктор может располагаться как внутри (рис. 1, а), так и вне (рис. 1, б) матрицы: в первом случае осуществляется раздача образца силами электромагнитной природы, во втором – сжатие. Наведенные в заготовке электромагнитным полем (ЭМП) индуктора токи 1) индуцируют вторичное ЭМП, которое вступает во взаимодействие с полем индуктора и 2) вызывают джоулев нагрев заготовки. Параметры оборудования и заготовки в КМИС выбираются таким образом, чтобы магнитное поле индуктора не успевало диффундировать в образец. Энергия ЭМП трансформируется в энергию механического движения заготовки: она отталкивается от индуктора, избегая проникновения в нее внешнего магнитного поля. Начальная стадия процесса характеризуется повышенным удельным сопротивлением контактной зоны нахлеста, что способствует преимущественному нагреву именно этой зоны индуцированными в заготовке токами. Синергизм механического и термического факторов приводит к образованию сварного соединения в зоне нахлеста, причем на качество этого соединения существенно влияют параметры заготовки, оборудования и результирующего КМИС-процесса [1; 2].

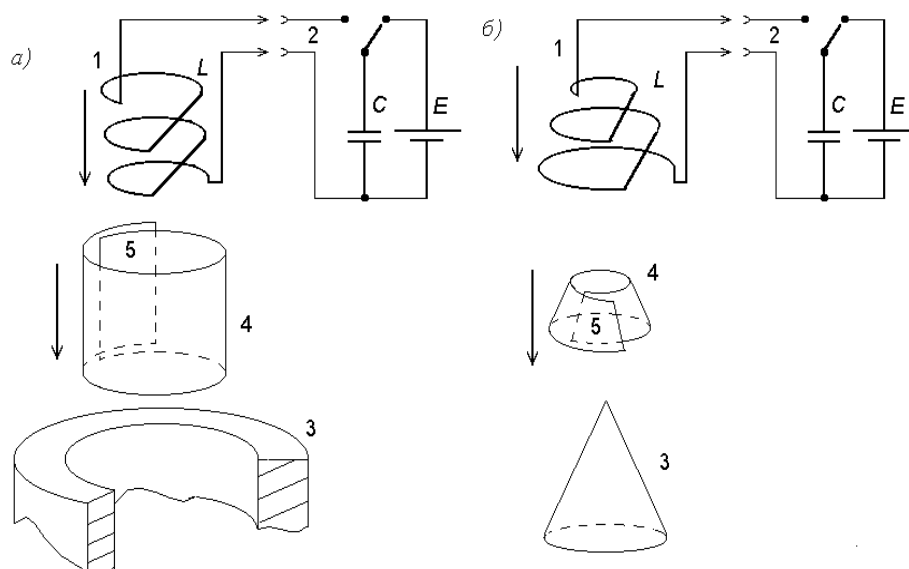


Рис. 1. Схема КМИС: а – с работой электромагнитных сил на раздачу заготовки; б – на сжатие

Информационная модель КМИС-процесса

Наиболее частыми и критичными дефектами изготовления деталей в КМИС-технологии являются [3]: 1) чрезмерный перегрев контактной зоны, сопровождающийся выплеском сравнительно большого количества металла или даже прогоранием, и 2) наоборот, недогрев и недосжатие в области нахлеста, выражающийся в неравномерном островном сваривании или в отсутствии соединения вообще. Чтобы по возможности исключить подобные ситуации в серийном производстве требуется точно устанавливать режимы КМИС для каждого конкретного изделия и процесса. При этом в распоряжении технологов оказываются следующие параметры управления: энергия и частота разряда. Из-за разнообразия свариваемых материалов, форм и размеров заготовок для выбора оптимальных параметров КМИС производителям приходится выполнять множество настроечных экспериментов, что заметно удорожает производство. В данной работе предлагается кардинально сократить объем экспериментальной оптимизации КМИС-процесса, используя вычислительный эксперимент (ВЭ) с соответствующими информационными моделями (ИМ).

Авторами отработана оригинальная ИМ КМИС, схема которой приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структура ИМ КМИС

При реалистичных физических допущениях модель принимает математическую форму:

– уравнения движения (сдавливания заготовки) Ньютона –

$$d x/dt = v(t) , (1)$$

$$d v /dt = P_M(t)/(x_0 \rho) e^{-G(T)T_{пл}/5P_M(t)T} , (2)$$

$$P_M(t) = U_0^2 C / (\pi r_3^2 l) \sin^2 \omega t e^{-2t/\tau} , (3)$$

$$G(T) = G|_{T=0} (1 - T/T_{пл})^2 \cdot e^{-100 \cdot [(T - T_{пл})/T_{пл}] / [\xi e^{-100 \cdot [(T - T_{пл})/T_{пл}] + 1}]} (4)$$

– тепловыделение и нагрев в сварной зоне –

$$dQ/dt = q(t) = U_0^2 R_k(y) \cdot (R_k(y) + R_3)^{-2} \sin^2 \omega t \cdot e^{-2t/\tau} , (5)$$

$$dQ_{\Sigma}/dt = q_{\Sigma}(t) = U_0^2 (R_k(y) + R_3)^{-1} \sin^2 \omega t e^{-2t/\tau} , (6)$$

$$T_1(t) = [Q(t)/C\rho - \Delta H/C\xi - 1/2 T_{пл} \cdot (a_{Me}t)^{1/2}] / [\delta + 1/3 \cdot (a_{Me}/a_{Ox})^{1/2} \delta^2 / (a_{Ox}t)^{1/2} + \xi(t)] , (7)$$

$$\xi = \xi(t) = CT_{пл} / (CT_{пл} + \Delta H) \cdot (a_{Me})^{1/2} [(t - t^{**})^{1/2}] , (8)$$

$$t^{**}: T_1(t^{**}) = 1/C\rho \cdot Q(t^{**}) / [\delta + 1/2 \cdot (a_{Me}t^{**})^{1/2} + 1/3 \cdot (a_{Me}/a_{Ox})^{1/2} \delta^2 / (a_{Ox}t^{**})^{1/2}] = T_{пл} , (9)$$

$$R_3 = 2\pi r_3 / (\sigma_3 x_0 l_3) , (10)$$

$$R_k(y) = R_k|_{y=y_0} \cdot e^{100(y - 0.9 y_0)/y_0} / [e^{100(y - 0.9 y_0)/y_0} + 1] , (11)$$

– выплеск расплава из сварной зоны –

$$dy/dt = y_0 / (\delta + \xi(t)) \cdot v(t), \quad (12)$$

обозначения и размерность величин в которых соответствуют используемым в теории сварки [1; 2] и введенным на схеме рис. 3.

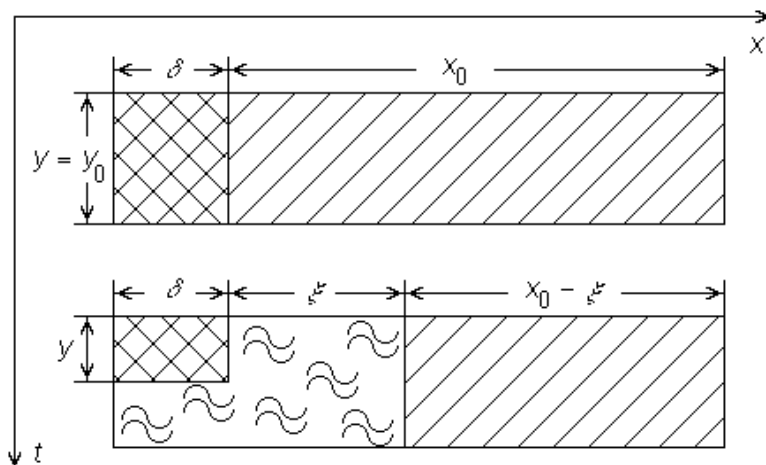


Рис. 3. Геометрия контактной зоны в технологии КМИС и обозначения в уравнениях (1)–(12)

В таблице приведены параметры модели (1)–(12), предоставленные ведущим предметным специалистом (проф. В.Л. Стрижаковым, Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Россия). Эти значения соответствуют технологии КМИС оболочечных изделий для аэрокосмической промышленности [3].

Таблица 1

Характерные диапазоны условий и параметров КМИС

Параметр	Единица измерения	Минимальное значение	Максимальное значение
Емкость накопителя C	мкФ	50	5000
Напряжение разряда U_0	кВ	5	50
Собственная индуктивность установки L_y	мкГ	0.01	1
Собственная частота установки $f_y = \omega/2\pi$	кГц	10	150
Энергоемкость разрядного устройства E_0	кДж	3	100
Толщина свариваемого изделия x_0	мм	0.3	3
Радиус оболочки r_3	см	1	20
Толщина окисной пленки δ	нм	3	15
Шероховатость поверхности заготовки Δ	мкм	0.3×10	2×200

Удельная электропроводность $\text{Me } \gamma$	$\text{Om}^{-1}\text{cm}^{-1}$	6000	70000
Температуропроводность $\text{Me } a$	cm^2/c	0.1	1
Магнитная проницаемость $\text{Me } \mu$	μ_0	1	10^5
Легкоплавкость Me , равная $\Delta H/CT_{\text{пл}}$	безразм.	0.3	10

Результаты компьютерного эксперимента

Результаты интегрирования уравнений движения и разогрева заготовки при КМИС (1)–(12) на ЭВМ в типичных для производства тонких оболочек из цветных металлов условиях приведены на рис. 4. Эти данные свидетельствуют о сильной нелинейности процесса, выражающейся в быстрой смене ведущего механизма образования соединения – за счет нагрева контактной зоны, который протекает в т. н. «режиме с обострением». Этот режим характеризуется исключительно быстрой сменой ведущего механизма процесса в некоторый момент времени.

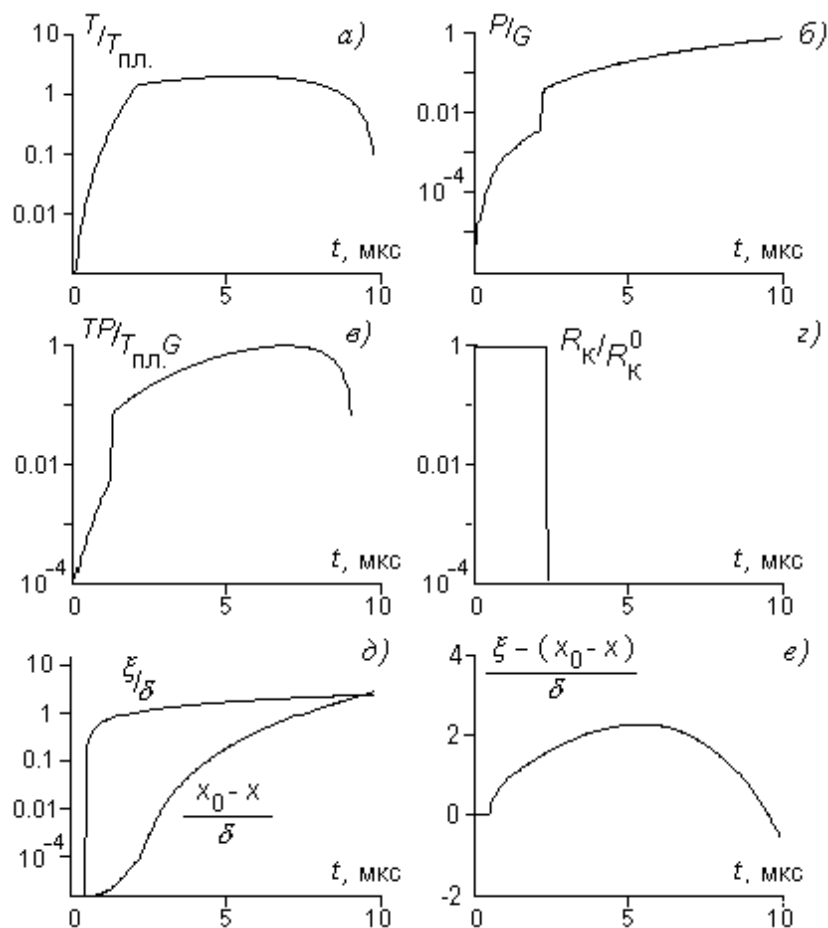


Рис. 4. Динамика параметров процесса КМИС:

а – температуры; б – магнитного давления;

в – интегральной энергетической характеристики процесса;

Γ – сопротивления нахлеста;

d – глубины раплавления Me ξ и толщины выплеснутого слоя (расплава);

e – сравнительной значимости теплового и механического факторов

при образовании сварного соединения

(для наглядности и общности результаты компьютерных расчетов приведены в безразмерном виде)

Так как момент перехода в КМИС-процессе от классической сварки плавлением к сварке давлением [1; 2] зависит от множества параметров (электрических характеристик разрядного устройства, геометрических и теплоэлектрофизических параметров заготовки, качества обработки поверхности и целого ряда тонкостей технологии КМИС), сваривание может осуществляться по самым разнообразным сценариям. Приведенный на рис. 4 вариант сваривания близок к оптимальному:

1) прогревается и выплескивается слой Me (металла), толщина которого сопоставима с неидеальностью поверхности;

2) динамика температуры и давления *локализуется в зоне контакта* таким образом, что непроизводительные энергетические потери также невелики.

Об адекватности, следовательно, и прогностических возможностях предложенной ИМ КМИС свидетельствуют фотографии микрошлифов на рис. 5, отвечающие условиям качественного (*a*, *b*) сваривания и недогрева (*в*) согласно модельным расчетам. На фотографиях хорошо видно, что параметрам сваривания, которые характеризуются в нашей модели как недогрев, отвечает локализация сварного соединения в отдельных точках – островах. В терминах современной науки – нелинейной теплопроводности это т. н. S-режим теплообмена.

Практическая ценность предлагаемых ИМ и настроечного ВЭ состоит в том, что инициализацией модели КМИС (1)–(12) по опытным данным удастся сокращать объем необходимых оптимизационных технологических экспериментов на порядок и более [3].

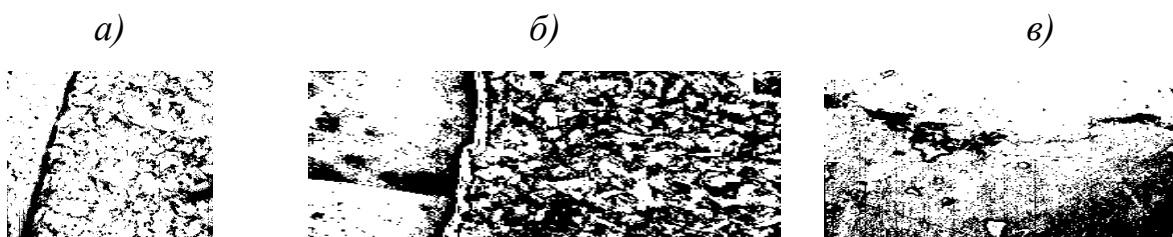


Рис. 5. Микрошлифы сварного соединения: а, б – качественное сваривание; в – «островное» сваривание, недогрев

Главным направлением совершенствования разработанной модели КМИС (1)–(12) видится совершенствование гидродинамического блока модели – с целью адекватно учесть тонкие поверхностные эффекты, роль которых возрастает с миниатюризацией изделий при соответствующем снижении энергоемкости процесса. Также практически важно детализовать описание первичного нагрева, чтобы интерпретировать влияние специфических факторов, например, вакуума на динамику, эффективность и качество КМИС.

Выводы

На основании анализа элементарных процессов в технологии КМИС установлена иерархия соответствующих временных и энергетических показателей, сконструирована адекватная точечная модель динамики сваривания.

Информационная модель реализована как соответствующий программный модуль в системе MathCAD и инициализирована в соответствии с имеющимися данными технологического эксперимента.

Посредством разработанной модели КМИС описаны технологически важные черты его динамики:

1) подтвержден факт равной значимости тепловых и механических процессов при образовании сварного соединения;

2) установлен переключающий характер нелинейности, обуславливающей динамику КМИС – сначала ведущую роль играют тепловые процессы в зоне контакта, которые (из-за сильной зависимости контактного сопротивления от состояния поверхности в зоне нахлеста) затем быстро вытесняются процессами механическими;

3) составлена классификация тепловых режимов контактной зоны, исследована динамика температурного поля.

Совершенствования ИМ КМИС видится в описании динамики сваривания с учетом пространственной распределенности процесса и интеграции компьютерного эксперимента с физико-технологическим.

Список литературы

1. Дудин А.А. Магнитно-импульсная сварка металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 128 с.
2. Кочергин К.А. Сварка давлением. – Л.: Машиностроение, 1973. – 240 с.
3. Strizhakov E.L. et al. Classification of methods and examination of the process of resistance magnetic-pulse welding // Welding International. – 2004. – V. 18. – №1. – P. 148.