

**Цымбалова Виктория Михайловна**

магистрант

**Цымбалов Денис Сергеевич**

старший преподаватель

**Яценко Олег Вадимович**

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Донской государственный

технический университет»

г. Ростов-на-Дону, Ростовская область

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ**

***Аннотация:** в данной статье авторами разработана и исследована математическая модель контактной магнитно- импульсной сварки. Основу модели составляют эволюционные дифференциальные уравнения, описывающие тепло-массообмен в формирующемся сварном соединении. Расчеты на ЭВМ подтверждают адекватность модели вплоть до применимости в целях параметрической оптимизации. Результаты выполненных исследований актуальны для высокотехнологичных отраслей машиностроения.*

***Ключевые слова:** математическое моделирование, контактная магнитно-импульсная сварка, дифференциальные уравнения, компьютерная имитация.*

### *Введение*

Развитие сварочных технологий стимулируется потребностями наиболее технологичных отраслей машиностроения [1; 2]. Процесс контактной магнитно-импульсной сварки (КМИС) основан на джоулевом нагреве и последующем механическом сдавливании контактной зоны посредством мощного электромагнитного поля [1].

### *Физическая модель и технология*

Собственно технология КМИС, применяемая к тонкостенным оболочечным конструкциям, тонких металлических образцов (оболочек) схематизирована на рис. 1. Инструментальное обеспечение КМИС объединяет индуктор 1 (рис. 1), конденсаторно-коммутирующий блок (2) и матрицы с надлежащими формами и размерами (3). Заготовка представляет собой тонкую закольцованную форму будущего изделия (4) пластину из цветного металла: небольшой нахлест (5) призван обеспечить сварное соединение. Помещается заготовка между матрицей и индуктором. Затем через индуктор разряжают конденсаторную батарею. Индуктор может размещаться как внутри (рис. 1, а), так и вне (рис. 1, б) матрицы. В первом случае происходит раздача образца силами электромагнитной природы, во втором – его сжатие: наведенные в заготовке электромагнитным полем (ЭМП) индуктора токи, во-первых, индуцируют вторичное ЭМП, которое вступает во взаимодействие с полем индуктора и, во-вторых, вызывают омический нагрев заготовки. Параметры заготовки и оборудования в КМИС выбираются так, чтобы магнитное поле индуктора не успевало диффундировать внутрь образца. При этом энергия ЭМП трансформируется в энергию механического движения заготовки: отталкиваясь от индуктора, она препятствует проникновению в нее (внешнего) магнитного поля. Первичный этап процесса характеризуется повышенным удельным сопротивлением контактной зоны (нахлеста), что способствует локальному нагреву этой зоны индуцированными токами. В совокупности механическое и термическое воздействие ЭМП приводят к формированию в зоне нахлеста сварного соединения. Качество последнего определяют параметры заготовки, оборудования и соответственно результирующего КМИС-процесса [1; 2].

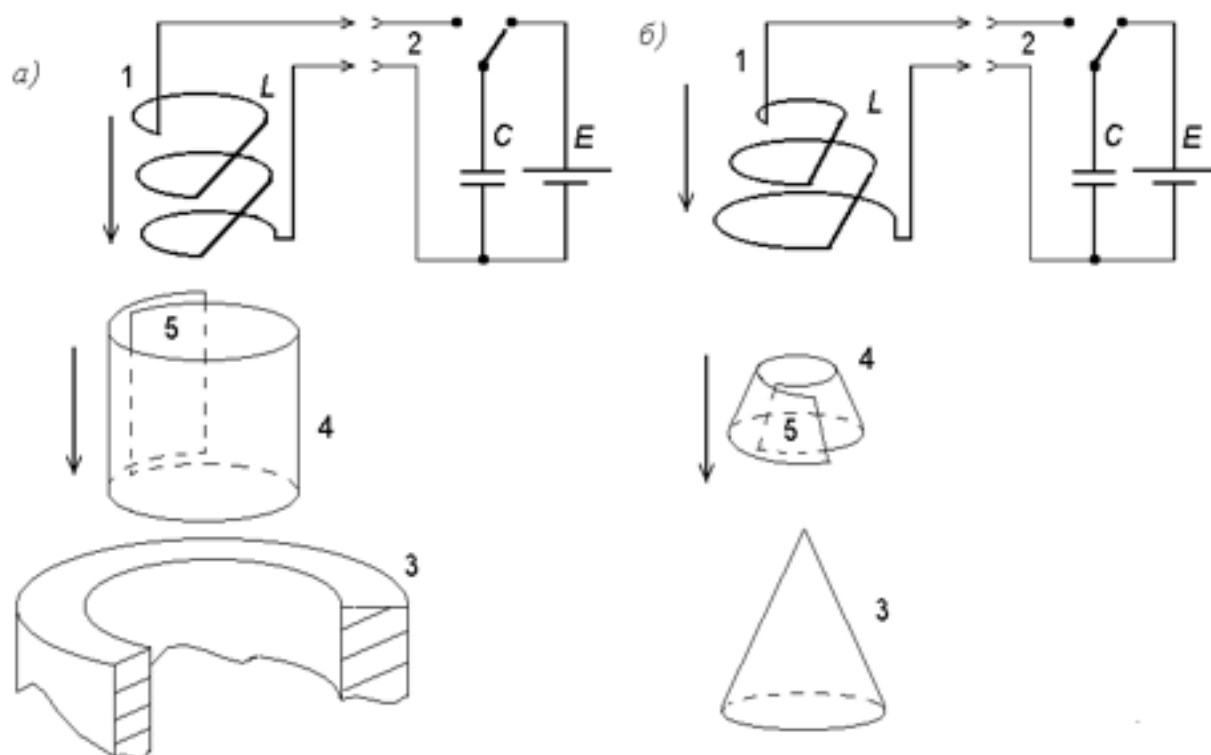


Рис. 1. Схема КМИС: а – с работой электромагнитных сил на раздачу заготовки; б – на сжатие

### *Математическая модель КМИС-процесса*

Частыми и критичными дефектами изготовления деталей посредством КМИС являются [3] перегрев контактной зоны, сопровождающийся выплеском недопустимого объема металла вплоть до прогорания и, наоборот, недогрев и соответственно недосжатие нахлеста, результатом чего служит неравномерное островное сваривание или вообще отсутствие соединения. Чтобы исключить подобные ситуации в серийном производстве необходимо точно устанавливать режимы КМИС для каждого изделия и/или процесса. Практически в распоряжении технологов имеются энергия и частота разряда – как управляющие параметры. Вследствие разнообразия материалов, форм и размеров заготовок для оптимизации КМИС производителям приходится выполнять множество настроечных экспериментов, что сильно удорожает производство. Здесь авторы предлагают

кардинально сократить объем экспериментальной оптимизации КМИС, используя вычислительный эксперимент (ВЭ) с оригинальной математической моделью (ММ) процесса КМИС.

Схема отработанной авторами ММ КМИС приведена на рис. 2.

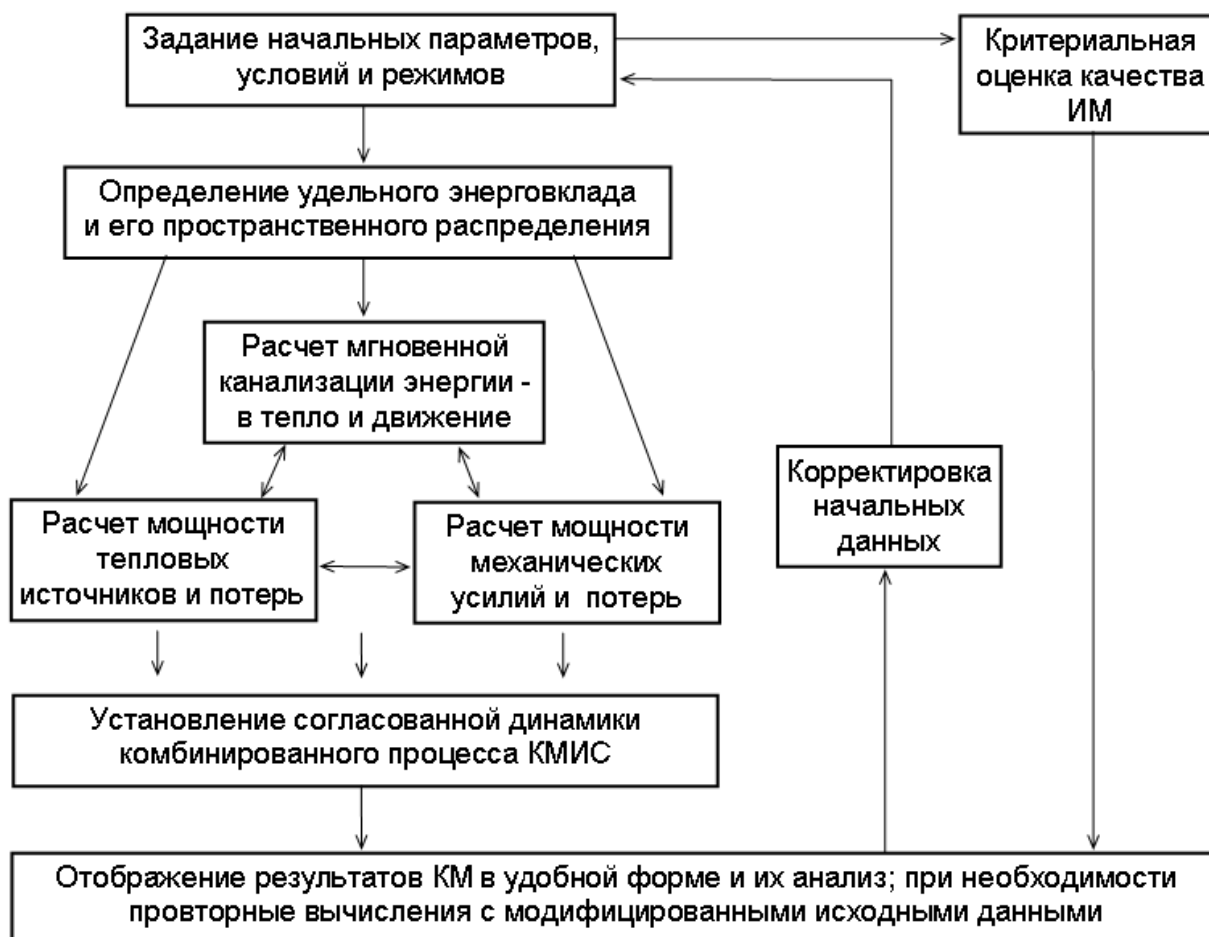


Рис. 2. Структура ИМ КМИС

При реалистичных физических допущениях эта модель принимает математическую форму:

*Уравнения движения (сдавливания заготовки) Ньютона*

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

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

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

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

*Тепловыделение и нагрев в сварной зоне*

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

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

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

$$/ [\delta + 1/3 \cdot (a_{Me}/a_{Ox})^{1/2} \delta^2 / (a_{Ox}t)^{1/2} + \xi(t)], \quad (7)$$

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

$$t^{**}: T_1(t^{**}) = 1/C\rho \cdot Q(t^{**}) / [\delta + 1/2 \cdot (a_{Me}t^{**})^{1/2} +$$

$$+ 1/3 \cdot (a_{Me}/a_{Ox})^{1/2} \delta^2 / (a_{Ox}t^{**})^{1/2}] = T_{пл}, \quad (9)$$

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

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

*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.

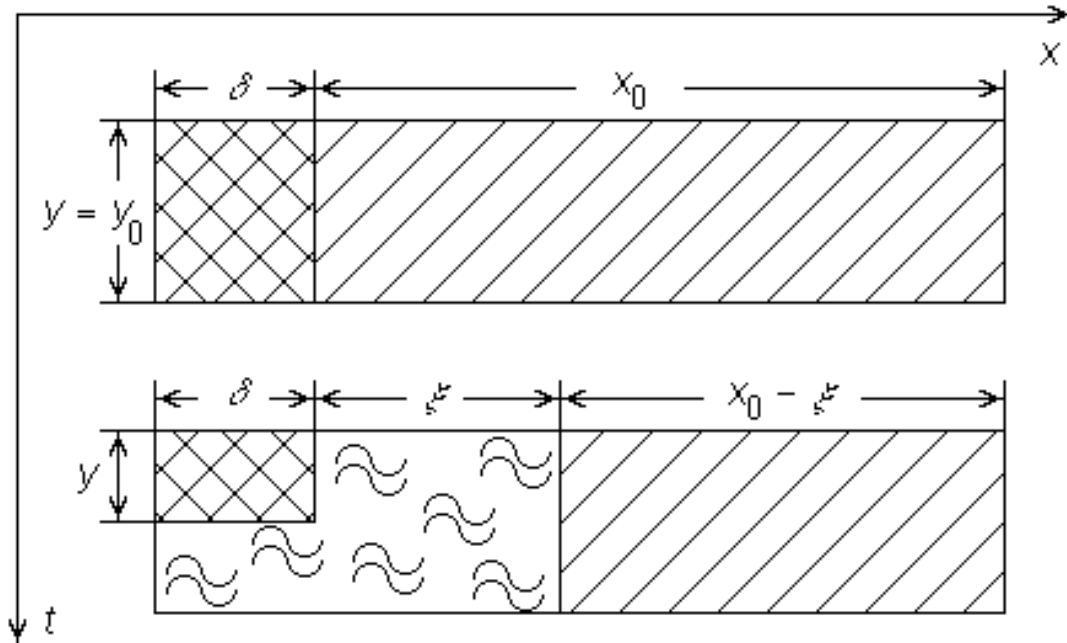


Рис. 3. Геометрия контактной зоны в технологии КМИС  
и обозначения в уравнениях (1)–(12)

В нижеприведенной таблице собраны параметры модели (1)–(12), предоставленные ведущим специалистом в области КМИС проф. *В.Л. Стрижаковым* (Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия). Эти значения отвечают 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 $f_y = \pi/2\pi$	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 $\delta$	нм	3	15
Шероховатость поверхности заготовки $\Delta$	мкм	$0.3 \times 10$	$2 \times 200$
Удельная электропроводность $Me$ $\sigma$	$\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	6000	70000
Температуропроводность $Me$ $a$	$\text{см}^2/\text{с}$	0.1	1
Магнитная проницаемость $Me$ $\mu$	$\mu_0$	1	$10^5$
Легкоплавкость $Me$ , равная $\Delta H/CT_{пл}$	безразм.	0.3	10

*Результаты компьютерного эксперимента с моделью*

Результаты численного интегрирования уравнений движения и разогрева заготовки в КМИС (1)–(12) применительно к условиям производства тонких оболочек из цветных металлов приведены на рис. 4. Они свидетельствуют о триггерной (переключательной) нелинейности процесса, которая проявляется в быстрой смене ведущего механизма образования соединения. Причиной здесь служит протекающий в т.н. «режиме с обострением» нагрев контактной зоны.

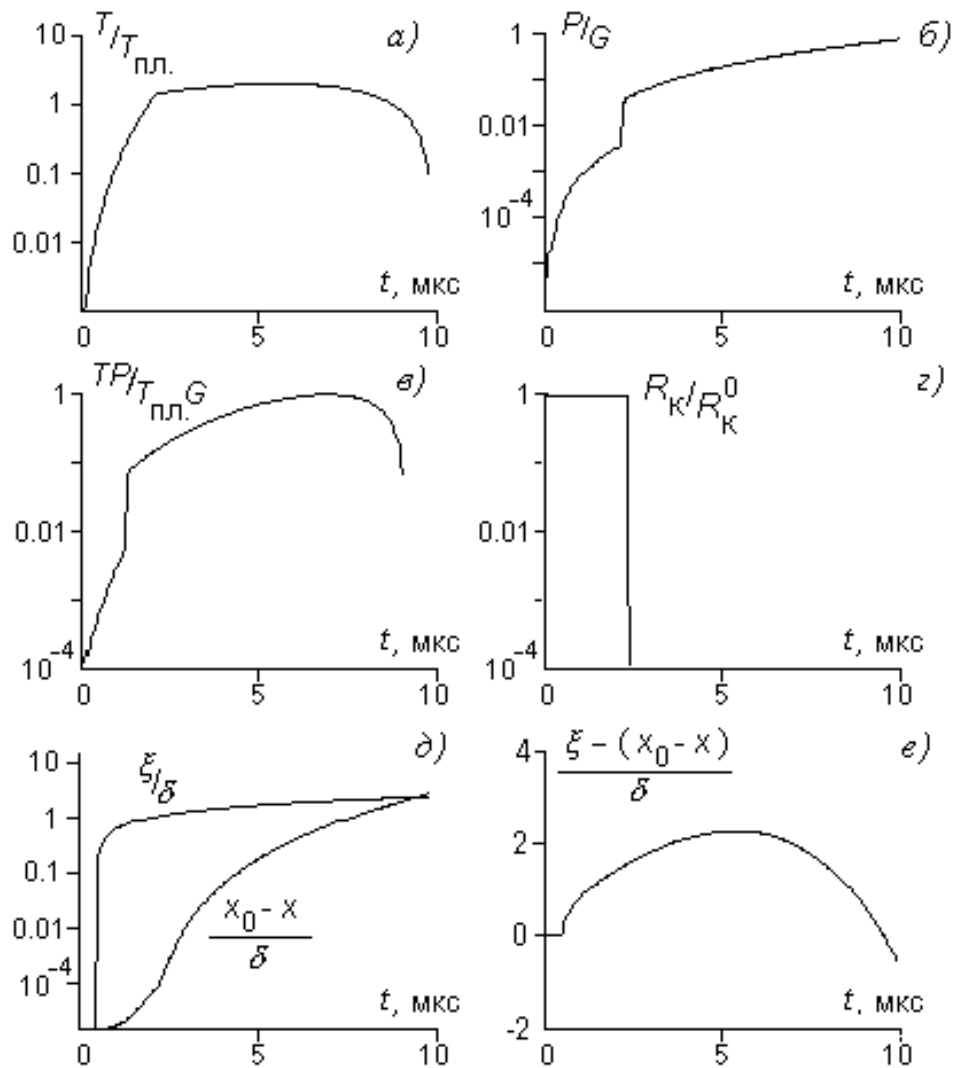


Рис. 4. Динамика параметров процесса КМИС: *a* – температуры; *б* – магнитного давления; *в* – интегральной энергетической характеристики процесса; *г* – сопротивления нахлеста; *д* – глубины раплавления Ме  $\xi$  и толщины выплеснутого слоя (расплава); *е* – сравнительной значимости теплового и механического факторов при образовании сварного соединения.

Для наглядности и общности результаты компьютерных расчетов приведены в безразмерном виде

Поскольку момент перехода в КМИС от *сварки плавлением* – к *сварке давлением* [1; 2] зависит от множества параметров (в частности, электрических характеристик разрядного устройства, геометрических и теплоэлектрофизических параметров заготовки, качества обработки поверхности, ряда прочих тонкостей),

сваривание может осуществляться по самым разнообразным сценариям. Отображенный на рис. 4 вариант практически оптимален: 1) прогрелся и выплеснулся слой металла, толщина которого сопоставима с масштабом неидеальности поверхности, 2) необходимые для успешного сваривания температура и давление *локализируются в зоне контакта*, что снижает потери.

Об адекватности предложенной модели КМИС, в т. ч. прогностических возможностях, свидетельствуют фотографии микрошлифов на рис. 5. Здесь сведены результаты технического эксперимента, отвечающие в рамках наших расчетов условиям качественного (*а, б*) сваривания и недогрева (*в*). Отчетливо видно (рис. 5), что параметрам сваривания, которые в предложенной модели характеризуются как недогрев, отвечает локализация сварного соединения в отдельных точках – островах.

Прикладное значение предлагаемых здесь ММ и настроечного ВЭ состоит в том, что, инициализировав модель КМИС (1)–(12) по опытным данным, мы существенно сокращаем объем настроечной экспериментальной работы [3].

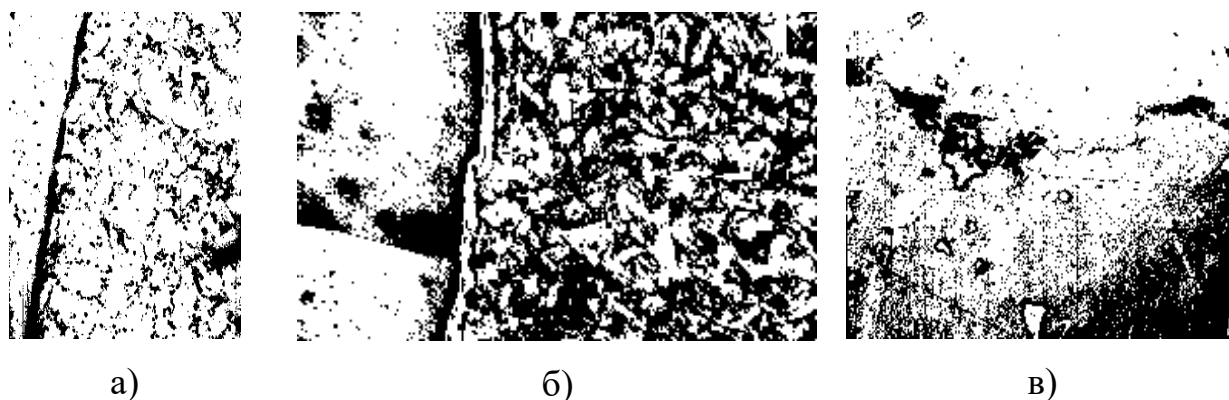


Рис. 5. Микрошлифы сварного соединения: *а, б* – качественное сваривание; *в* – «островное» сваривание, недогрев

В дальнейшем приоритетом в совершенствовании разработки (модели КМИС (1)–(12)) видится детализация гидродинамического блока. Это позволит адекватно описывать тонкие поверхностные эффекты, роль которых растет по мере миниатюризации изделий. Также важно детализировать описание джоулева



нагрева, что позволит интерпретировать влияние ряда специфических факторов (например, вакуума) на динамику, эффективность и качество КМИС.

### *Выводы*

На основании анализа элементарных физических эффектов в технологии КМИС установлена иерархия соответствующих временных и энергетических показателей, сконструирована адекватная математическая модель. Модель инициализирована по данным технического эксперимента.

С помощью разработанной модели КМИС корректно описаны существенные черты его динамики: 1) подтверждена равная значимость тепловых и механических процессов при образовании сварного соединения, 2) выявлен переключающий характер нелинейности, обусловленный сильной зависимостью контактного сопротивления от состояния поверхности в зоне нахлеста, 3) составлена классификация теплосиловых режимов контактной зоны.

Намечены направления совершенствования модели КМИС: учет пространственной распределенности процесса и интеграция компьютерного эксперимента с физико-технологическим.

### *Список литературы*

1. Дудин А.А. Магнитно-импульсная сварка металлов / А.А. Дудин. – М.: Металлургия, 1979. – 150 с.
2. Кочергин К.А. Сварка давлением / К.А. Кочергин. – Л.: Машиностроение, 1973. – 94 с.
3. Strizhakov E.L. Classification of methods and examination of the process of resistance magnetic-pulse welding / E.L. Strizhakov [et al] // Welding International. – 2004. – V. 18. – №1. – P. 57–60.