

УДК 004.8:621.791

В. В. АТРОЩЕНКО, В. Н. ТЕФАНОВ, К. В. ТЕФАНОВ**ГИБРИДНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА
КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОНДЕНСАТОРНОЙ Т-ОБРАЗНОЙ СВАРКИ**

Рассматриваются вопросы разработки гибридной интеллектуальной системы контроля качества конденсаторной Т-образной сварки. Строится математическая термомодеформационная модель, которая будет выступать в роли «учителя» для нейросетевой модели. *Гибридная интеллектуальная система; математическая модель; искусственный интеллект; конденсаторная сварка*

В авиастроении, автомобилестроении и радиоэлектронике широко распространены сварные соединения, выполненные контактной конденсаторной сваркой.

Специфические особенности заряда и разряда конденсаторов придают конденсаторной сварке металлов ряд энергетических и, что более важно, технологических достоинств. Основным энергетическим достоинством является малая установочная мощность сварочного оборудования. К технологическим достоинствам конденсаторной сварки можно отнести высокую точность дозирования энергии в конденсаторах и кратковременность их разряда (в среднем от нескольких десятых долей до 10–20 мс). Последнее позволяет легко соединять металлы, имеющие разные теплофизические свойства, а также существенно различные толщины (или диаметры). Кратковременность разряда конденсаторов дает еще одно важное преимущество – зона нагрева до сварочной температуры локализуется в небольшом объеме, необходимым для обеспечения достаточной прочности соединения. В результате появляется возможность использования конденсаторной сварки вблизи теплочувствительных элементов или на поверхностях, имеющих окончательную обработку (например, полированных или с декоративными покрытиями).

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА
КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ**

В условиях промышленного применения конденсаторной сварки особо острым становится вопрос технического контроля качества сварных соединений.

Одной из главных задач создания системы автоматизированного технического контроля

является максимальное уменьшение объема послеоперационного контроля. Современные процедуры разрушающего контроля сварных соединений трудоемки, дорогостоящи и малоэффективны. Используемые методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковой, рентгенопросвечивание и другие, в силу тех или иных причин имеют ограниченное применение.

Кроме того, эти методы могут быть использованы для регистрации качества уже выполненных соединений, что приводит не только к удорожанию операционного контроля, но и исключает возможность обнаружения брака в процессе сварки и своевременной корректировки режимов и настройки оборудования.

Целесообразнее и эффективнее выглядит применение методологии контроля сварных соединений, основанной на регистрации текущих значений физических параметров режима процесса сварки. В отличие от послеоперационного контроля данный метод не требует дополнительного времени и, кроме того, открывает возможность автоматического управления процессами.

В ГОСТ 16504-81 констатируется, что всякий контроль осуществляется в 2 этапа:

- получение первичной информации о фактическом состоянии некоторого объекта, о признаках и показателях его свойств (в первую очередь посредством измерений);
- сопоставление первичной информации с заранее установленными требованиями, нормами, критериями и получение вторичной информации о расхождениях фактических и требуемых данных или обнаружение соответствия (несоответствия) фактических данных ожидаемым.

На первом этапе осуществляется измерение и ввод параметров, характеризующих процесс

получения сварных соединений. На сварные соединения, полученные с помощью конденсаторной Т-образной сварки (КТС), влияет большое число параметров. Условно их можно разделить на 3 группы, связанные [1]:

- 1) со сварочными материалами;
- 2) с тепловыми процессами во время сварки (энергетические);
- 3) с механическими параметрами режима сварки.

Большое число параметров, влияющих на качество сварных соединений, и малый период времени между выполнением сварных соединений (0,5–2 с) приводит к тому, что системы контроля, основанные только на детерминированных моделях контроля качества сварных соединений, малоэффективны [2–4].

ГИБРИДНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ

Известно, что заданным требованиям по быстродействию удовлетворяют модели, построенные на базе искусственного интеллекта, особенно эффективно применение искусственных нейронных сетей (ИНС).

Как показано в работе [5], обученная ИНС способна оперативно и с высокой долей вероятности обнаруживать в реальном масштабе времени некачественное сварное соединение. В то же время одной из важнейших задач при создании ИНС является сложность ее обучения. В процессе обучения задают обучающую выборку, состоящую из входных сигналов и соответствующего желаемого отклика (маркированный пример). Для получения желаемого результата необходимо провести процедуру разрушающего или неразрушающего контроля. Эффективность обучения сети проверяется (тестируется) на множестве экспериментальных результатов, отличных от использованных при обучении [6]. В настоящей работе предлагается использовать достоинства детерминированных и ИНС моделей сведением к минимуму их недостатков путем построения гибридной модели.

В разработанной гибридной интеллектуальной системе контроля качества сварных Т-образных соединений, выполняемых конденсаторной сваркой, предложено использовать как детерминированную модель, так и модель на основе искусственного интеллекта (рис. 1).

Информация об установленных режимах и об используемых сварочных материалах содержится в базе данных системы и задается оператором.

С помощью датчиков, установленных на сварочной машине, измеряются параметры,

характеризующие динамические составляющие протекания процесса конденсаторной сварки. Сигналы, полученные с датчиков, проходят фильтрацию и нормирование, после чего оцифровываются в аналогово-цифровом преобразователе и поступают в ЭВМ. В блоке обработки информации данные структурируются, вычисляются зависимые параметры, такие как энергия, мощность, сопротивление и другие, записываются в журнал и поступают в систему поддержки принятия решения (СППР).

СППР (Decision Support System, DSS) — компьютерная автоматизированная система, целью которой является помощь специалистам, принимающим решение в сложных условиях для полного и объективного анализа предметной деятельности.

Существующие СППР, управляемые знаниями (Knowledge-Driven DSS), обеспечивают решение задач в виде фактов, правил, процедур.) и СППР, управляемые моделями (Model-Driven DSS), характеризуются, в основном, доступом и манипуляциями с математическими моделями (статистическими, финансовыми, оптимизационными, имитационными). Отметим, что некоторые OLAP-системы, позволяющие осуществлять сложный анализ данных, могут быть отнесены к гибридным СППР, которые обеспечивают моделирование, поиск и обработку данных. Архитектура СППР представляется разными авторами по-разному.

В нашем случае было принято решение использовать СППР, в основе которой лежит гибридная интеллектуальная система. Данный подход основан на применении обработки данных классическими методами инженерии знаний и ассоциативной обработки данных нейронными сетями. Его применение позволяет, с одной стороны, использовать результаты, достигнутые в технике представлений знаний, с удобством визуализации, вербализации и формализации знаний. С другой стороны, он позволяет использовать возможности обучения и естественной работы с нечеткими знаниями, свойственными нейронным сетям [7].

Появление термина «интеллектуальные» в сочетании с гибридами означает выход за рамки фундаментальных аналитических и статистических знаний, применение которых в теории управления отработано многолетней практикой, и их интеграцию с другими видами знаний и технологиями искусственного интеллекта — экспертными системами (ЭС), генетическими алгоритмами, искусственными нейронными сетями (ИНС), нечеткими системами (НС), кейс-системами и др.

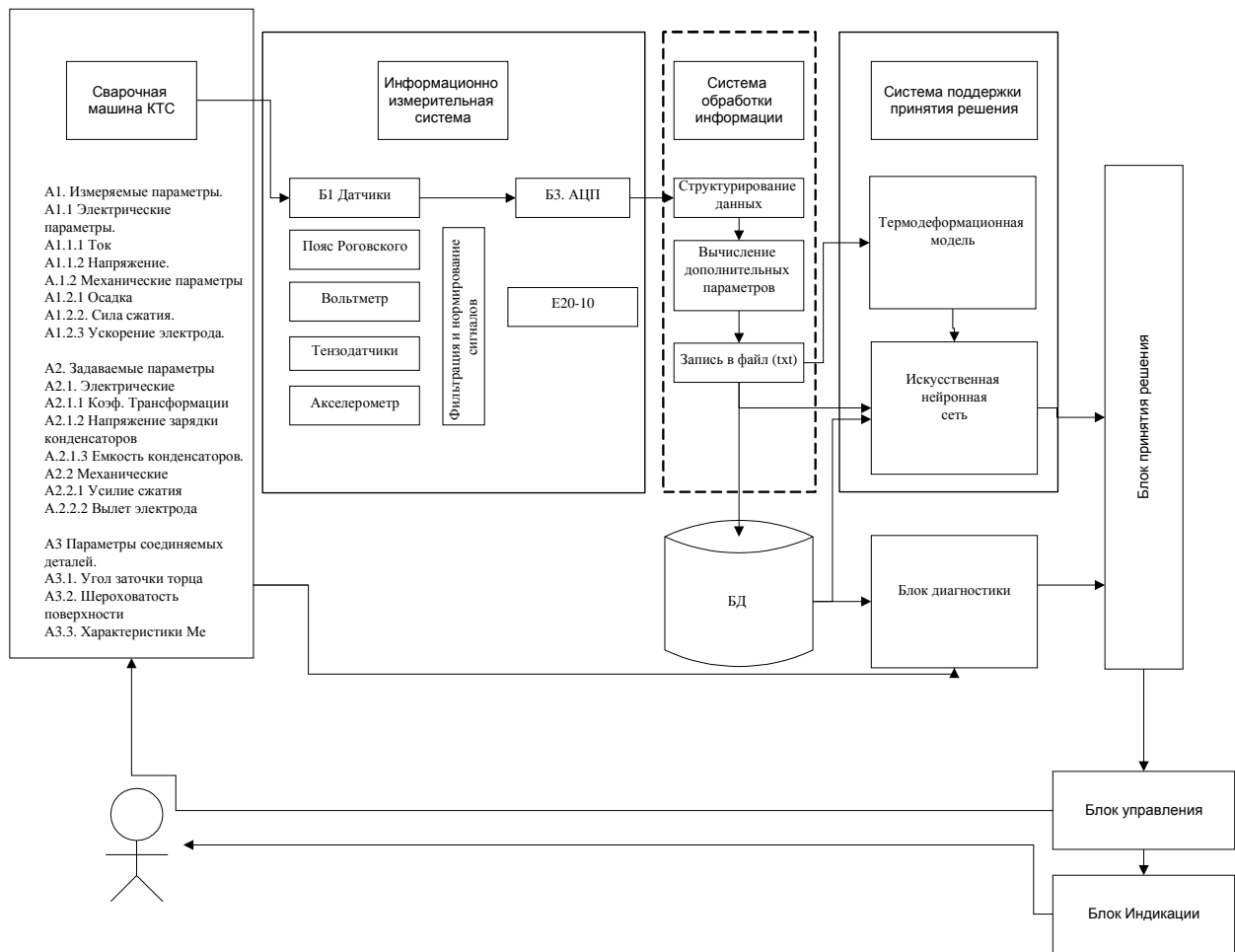


Рис. 1. Структурная схема гибридной интеллектуальной системы контроля качества конденсаторной сварки

Тем самым обеспечивается как многоаспектность исследования интеллекта человека, социальный характер выработки, оценки и принятия решений, так и расширение класса решаемых с помощью гибридов задач [6].

Одной из разновидностей гибридных интеллектуальных сетей является комбинированная гибридная интеллектуальная система [8], представленная на рис. 2.

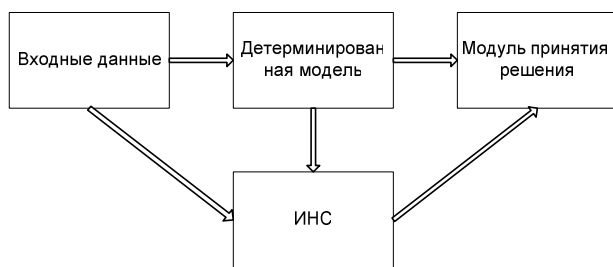


Рис. 2. Архитектура комбинированной гибридной интеллектуальной системы

Использование такой архитектуры позволяет применить достоинства детерминированных

моделей и ИНС и избежать недостатков, которые присущи данным моделям при их использовании отдельно друг от друга.

ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАТОРНОЙ Т-ОБРАЗНОЙ СВАРКИ

Детерминированная модель позволит учесть большое количество параметров и внешних воздействий, оказывающих влияние на результат, что поможет вводить корректировку весовых коэффициентов в нейросетевую модель. Использование ИНС существенно сократит время на принятие решения о качестве сварного соединения.

В качестве детерминированной модели целесообразно построить термодеформационную модель процесса конденсаторной Т-образной сварки. В ней описывается взаимосвязь параметров процесса сварки с качеством сварного соединения. В качестве промежуточного критерия здесь выступает температура в зоне свар-

ки, а в качестве обобщенного параметра качества – параметры деформации.

ИНС представляет собой обученную с помощью детерминированной модели нейронную сеть, которая необходима для осуществления контроля качества в режиме реального времени.

В предлагаемой работе представлено обоснование построения термдеформационной модели конденсаторной Т-образной сварки.

В работах [2, 3] с помощью системного анализа взаимосвязей между параметрами процесса путем не дискретно-логического моделирования было выявлено, что динамическое усилие сжатия свариваемых деталей сильнее коррелирует с качеством сварного соединения. Среди возможных вариантов была выбрана характеристика $\Delta P_{\max} / P_{cm0}$, что, по сути, является импульсом силы [4].

Недостатки разработанных моделей и систем контроля связаны, в первую очередь, с несовершенством конструкции датчиков и с выплесками металла из зоны сварки, когда измеряемое перемещение отвечает предъявляемым требованиям, а диаметр литого ядра при формировании соединения не соответствует. Во-вторых, в конденсаторных сварочных машинах

из-за инерции возникает запаздывание движения электродов. При этом от величины и скорости сжатия зависят интенсивность и характер пластической деформации, что является необходимым условием качества при КТС.

В работе [4] производится анализ методов автоматического управления процессом контактной КТС. Установлено, что для высокой достоверности контроля необходимо в качестве обобщающих параметров в массовом производстве использовать параметры динамического усилия, развивающегося в зоне сварки.

Структурная схема термдеформационной модели, учитывающая взаимодействие механических и энергетических параметров, а также влияние внешних и внутренних факторов представлена на рис. 3.

Рассмотрим параметры термдеформационной модели, задаваемые оператором при выборе режимов сварки: U_c – напряжение зарядки конденсаторов; C – емкость конденсаторной батареи; $K_{тр}$ – коэффициент трансформации; P_{cm} – сила сжатия (усилие приводной пружины); K характеристикам сварочного контура относятся: L – индуктивность и R сопротивление разрядного контура сварочной машины.

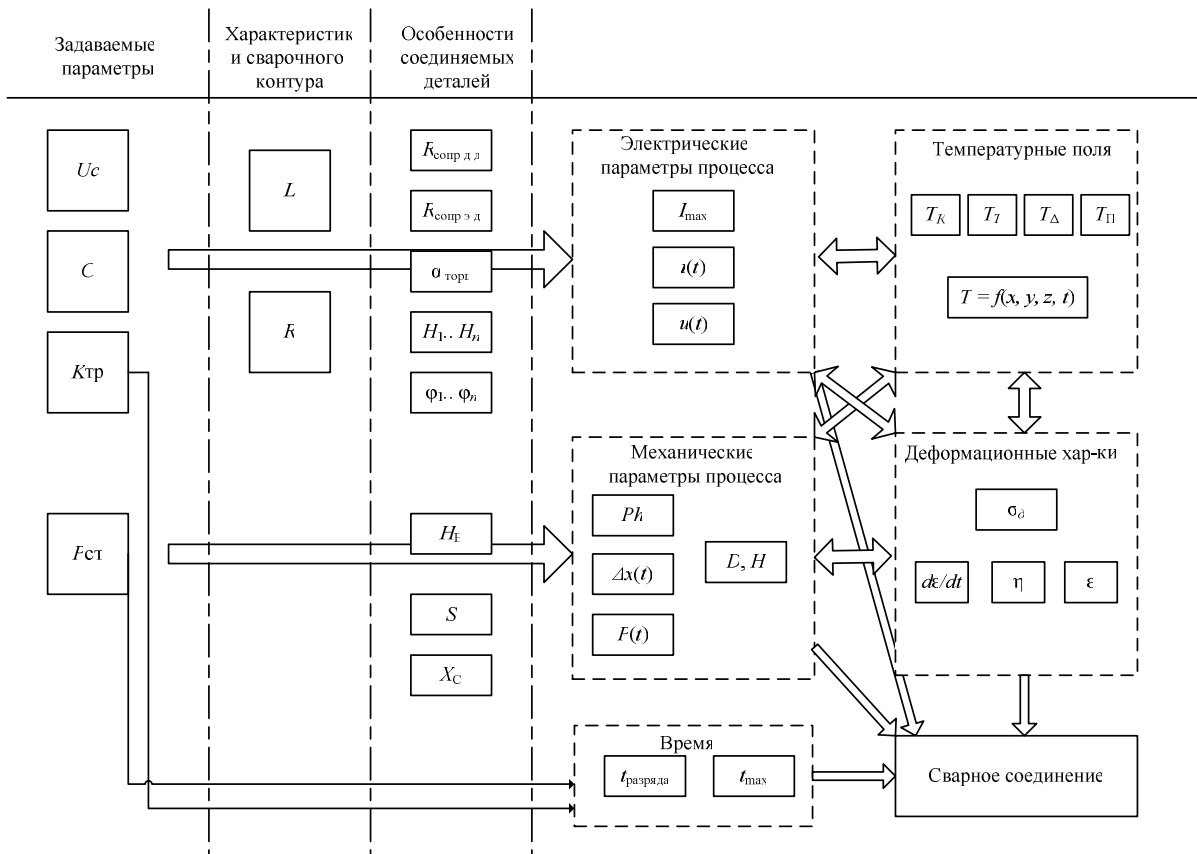


Рис. 3. Структурная схема термдеформационной модели КТС

Особенности соединяемых деталей: $R_{\text{сопр.д.д}}$ – сопротивление в промежутке «деталь-деталь», $R_{\text{сопр.э.д}}$ – сопротивление в промежутке «электрод-деталь», $\alpha_{\text{торц}}$ – угол заточки торца стержня (детали); $H_1 \dots H_n$ – высоты гаммы неровностей свариваемых поверхностей; $\varphi_1 \dots \varphi_n$ – углы при вершинах гаммы неровностей; x_c – химический состав среды; S – среднестатистическое межмолекулярное расстояние; H_{Σ} – напряженность внешних электромагнитных полей.

Проведем анализ источников энергии, участвующих в термомеханических процессах контактной КТС.

1. Сила сжатия P . Сдавливает металлы по площади контакта в холодном состоянии и производит осадку разогретого металла стержня, совершая работу Ph_m . Это ведет к росту температуры в деформированном стержне [9]:

$$T_k = \frac{Ph_m}{4m\sqrt{\lambda\gamma c} \cdot S\sqrt{t_{\text{ос}}}}, \quad (1)$$

где m – коэффициент формы температурной кривой ($m = 1/3 - 2/3$); $\lambda\gamma c$ – произведение коэффициента теплопроводности, плотности, объемной теплоемкости, соответственно; S – площадь стержня; $t_{\text{ос}}$ – время деформации (осадки). Это скачок температуры от действия осевой силы.

2. Сила сжатия P при всех способах сварки давлением обязательно превращается по плоскости свариваемого контакта в силу сдвига F . Это превращение оказывается самым последним эффектом при формировании сварного соединения. Межзеренный и межкристаллический сдвиг по плоскости контакта, деформации сдвига металла вокруг плоскости контакта являются завершающими фазами процесса сварки давлением [9]

$$T_{\Delta} = \frac{1}{6knt_{\text{сдв}}/\eta_0 + (1/T_{\text{пл}})}, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К·атом; n – число атомов в 1 см^3 ; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления; η_0 – динамическая вязкость Дж·с/см³; $t_{\text{сдв}}$ – время сдвига.

Это скачок температуры от перпендикулярно направленных радиальных сил сдвига.

3. Джоулево тепло. Выделяется при прохождении сварочного тока I за время t_H на изменяющихся в процессе сварки (сжатие и нагрев) электрических сопротивлениях контакта $R_k(t)$ и самого металла $R_m(t)$.

$$T_T = \frac{I^2 \sqrt{t_H} [R_k(t) + R_m(t)]}{4m\sqrt{\lambda\gamma c} \cdot S}. \quad (3)$$

4. Теплота Пельтье. При контактировании разнородных материалов, для которых граничные энергии весьма различны, в случае нагрева контакта током I , общее тепловыделение в зоне контакта будет определяться суммарной теплотой [9], т. е. $Q = I^2 Rt \mp III t$.

В зависимости от направления тока теплота Пельтье будет или понижать температуру по какую-то сторону плоскости контакта, или повышать ее против того значения, какое обеспечивает джоулево тепло.

Температура в стыке за счет полярной теплоты Пельтье составит:

$$T_{\Pi} = \pm \frac{III \sqrt{t_H}}{4m\sqrt{\lambda\gamma c} \cdot S}, \quad (4)$$

где Π – термоэлектродвижущая сила.

Оценивать относительную роль теплоты Пельтье для различных контактов можно посредством показателей термоэлектродвижущей силы, поскольку

$$\Pi = \alpha \theta, \quad (5)$$

где α – коэффициент термоэдс в мкВ/К; θ – абсолютная температура стыка.

Таким образом, суммировав рассмотренные выше составляющие, мы получим итоговую температуру в зоне сварного соединения:

$$T_{\text{св}} = \frac{I^2 \sqrt{t_H} [R_k(t) + R_m(t)]}{4m\sqrt{\lambda\gamma c} \cdot S} \pm \frac{III \sqrt{t_H}}{4m\sqrt{\lambda\gamma c} \cdot S} + \frac{Ph_m}{4m\sqrt{\lambda\gamma c} \cdot S\sqrt{t_{\text{ос}}}} + \frac{1}{6knt_{\text{сдв}}/\eta_0 + (1/T_{\text{пл}})}, \quad (6)$$

где $R_k(t)$ и $R_m(t)$ – изменяющиеся в процессе нагрева электрические сопротивления контакта и самого металла; t_H – время действия сварочного тока, т. е. время нагрева; $p_{\text{ос}}$ – осадочное давление по окончании нагрева, которое, как видно, нужно прикладывать за короткое время $t_{\text{ос}}$, чтобы осуществить окончательный, кратковременный, сваривающий сдвиг.

При разработке термомеханической модели возникает необходимость в количественной оценке сопротивления пластической деформации $\sigma_{\text{с.д}}$ металла в зоне формирования соединения. Под величиной $\sigma_{\text{с.д}}$ понимается интенсивность напряжений, достаточная для осуществления в теле или его части пластической деформации при заданных условиях деформирования.

Из определения понятия $\sigma_{\text{с.д}}$, общепринятого в теориях пластичности и обработки металлов давлением, следует, что оно является характеристикой деформируемого металла и зависит только от термомеханических условий

пластических деформаций, степени деформации ϵ , скорости u и температуры T . Поэтому оценивать $\sigma_{с.д.}$ при сварке рациональнее не измерением ее величины непосредственно в процессе формирования соединения, так как осуществить это технически трудно, а расчетом с использованием данных и опыта обработки металлов давлением.

В данной работе для расчета сопротивления металла предлагается использовать метод, при котором $\sigma_{с.д.}$ выражается в относительных единицах (коэффициентах) при изменении T , ϵ и u в отдельности. Расчетные значения $\sigma_{с.д.}$ определяются по зависимости

$$\sigma_{с.д.} = \sigma_{с.д.0} K_T K_\epsilon K_u, \quad (7)$$

где $\sigma_{с.д.0}$ – базисное значение сопротивления пластической деформации при стандартных условиях определения; K_T , K_ϵ , K_u – температурный, степенной и скоростной коэффициенты, функционально зависящие от T , ϵ и u , соответственно.

Оценить величину пластической деформации через изменение расстояний между материальными точками затруднительно вследствие особенностей КТС. Процесс временной пластической деформации при КТС, учитывая приведенные выше положения, можно уподобить процессу пластической деформации цилиндра силой сжатия и степень деформации ϵ рассчитать по смещенному объему

$$\epsilon = \frac{V'_t}{V}, \quad (8)$$

где V'_t – смещенный объем; V – деформируемый объем.

При КТС V'_t равен сумме приращения объема зоны нагрева за счет теплового объемного расширения V'_t и объема металла, вытесненного при вдавливании электродов, V''_t (рис. 4):

$$V'_t = \Delta V'_t + V''_t. \quad (9)$$

Если изменение V'_t в процессе формирования соединения выразить через функцию времени $d\Delta V'_t / dt = f_2(t)$, то объем металла, вытесненный к моменту времени t , равен:

$$\Delta V'_t = \int_0^t f_2(t) dt. \quad (10)$$

По полученному в ходе эксперимента макрошлифу (рис. 5) определяют объем металла, вытесненный при вдавливании электродов для качественного Т-образного сварного соединения:

$$\Delta V'_t = 2,65 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

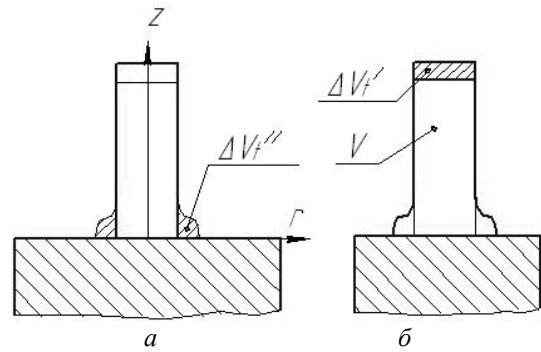


Рис. 4. Схема пластической деформации в процессе КТС (а) и деформации цилиндра при одноосном сжатии (б)



Рис. 5. Макроструктура сварного шва при КТС

Приращение $\Delta dV'_t$ элементарного объема dV при нагреве можно представить как сумму приращений за счет теплового расширения $d\Delta V'_t^*$ и увеличения объема при переходе из твердого состояния в жидкое $d\Delta V'_t^{**}$:

$$d\Delta V'_t = d\Delta V'_t^* + d\Delta V'_t^{**}. \quad (11)$$

Если уравнение изотермы имеет вид $r = f_3(z, t)$, то

$$\Delta V'_t^{**} = c\pi \int_{z_1}^{z_2} ([f_3(z, t)]^2 dz), \quad (12)$$

где c – коэффициент расширения при переходе в жидкую фазу.

Объем зоны пластического деформирования при нагреве

$$V'_t = \iiint_{V_t} r dr dz d\varphi = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{r_1}^{r_2} r dr \int_0^z dz \quad (13)$$

и его приращение

$$\Delta V'_t = \iiint_{V_t} \beta(z, r, t) T(z, r, t) r dr dz d\varphi. \quad (14)$$

Степень деформации в момент времени t согласно выражениям (8) – (14):

$$\varepsilon_t = \left[\frac{1}{\iiint_{V_t} r dr dz d\varphi} \times \left[\iiint_{V_t} \beta(z, r, t) T(z, r, t) r dr dz d\varphi + c\pi \int_{z_1}^{z_2} [f_3(z, t)]^2 dz + \int_0^t f_2(t) dt \right] \right] 100\%.$$

Относительная деформация, называемая скоростью деформации

$$u_t = \frac{d\varepsilon_t}{dt}. \quad (15)$$

Для расчета $\sigma_{с.д.}$ по выражению (7) необходимо найти значения T , ε , u в момент времени t по формулам (6), (14) и (15) и по ним определить экспериментальные значения κ_T , κ_ε , κ_u , а затем по уравнению (7) величину $\sigma_{с.д.}$.

Приведенные расчеты можно существенно упростить, применив усредненные оценки процесса пластической деформации при КТС.

Нагрев металлических тел сопровождается увеличением объема, равным:

$$V'_t = V_0 (1 + \beta_V T), \quad (16)$$

где V_0 – объем тела при $T = 0$, β_V – термический коэффициент объемного расширения.

$$V'_t = 6 \cdot 10^{-9} (1 + 17,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1445) = 6,15 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Приращение объема при нагреве составит

$$\Delta V'_t = 0,15 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Рассчитаем смещенный объем

$$V'_t = 0,15 \cdot 10^{-9} + 2,65 \cdot 10^{-9} = 2,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Степень деформации при ТКС равна

$$\varepsilon = \frac{2,8 \cdot 10^{-9}}{6 \cdot 10^{-9}} \cdot 100\% = 46,67\%.$$

На рис. 6 показано изменение степени деформации при КТС от температуры [10].

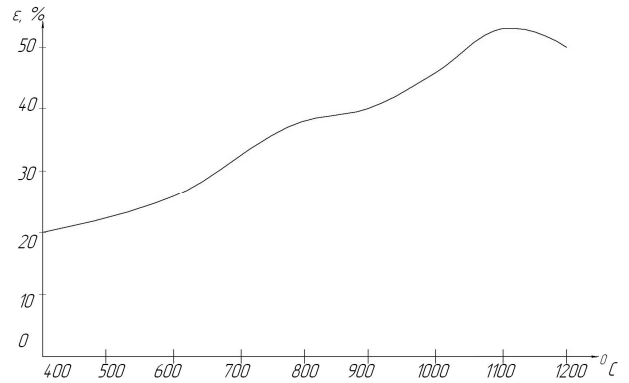


Рис. 6. Изменение степени деформации сплава Х20Н80

Сопротивление деформации стержня определяем по методике, известной из обработки металлов давлением. Ее использование возможно на основе подобию процессов осадки цилиндрического стержня при сварке и ковке, которое вытекает из одинакового напряженного и температурного $[(0,5-0,9)T_{пл}]$ состояний металла при осадке [10].

Зависимость $\sigma_{с.д.}$ от температуры T , степени ε и скорости u деформации выражают, соответственно, эмпирической зависимостью, полученной приемами регрессивного анализа (подсчет эмпирических коэффициентов корреляции и метод наименьших квадратов):

$$\sigma = \frac{890 \cdot \varepsilon^{0,35} \cdot u^{0,098}}{e^{0,032t}}. \quad (17)$$

К основным особенностям КТС относится несимметричность температурного поля деталей относительно стыка, а также их различное напряженное состояние – одноосное в стержне и трехосное в основании. Это предопределяет осадку стержня на всю установочную длину его вылета из зажимных губок, значительное развитие площади контакта деталей и образование соединений в твердой фазе.

В середине процесса в результате нагрева сопротивление деформации $\sigma_{с.д.}$ и реакция N металла в зоне сварки снижаются (рис. 7). Это приводит к нарушению равновесия силы F , действующей на подвижный электрод, и реакции N . Электрод начинает перемещаться и, деформируя стержень, оказывает влияние как на тепловыделение через площадь контакта и плотность тока, так и на величину сопротивления деформации $\sigma_{с.д.}$, которая является функцией температуры T , степени ε и скорости u деформации. Нагреву до максимальной температуры соответствует минимальная величина реакции N . Дальнейший ее рост связан с уменьшением температуры в результате снижения

тока и увеличением $\sigma_{с.д}$ при интенсивном развитии деформационных процессов.

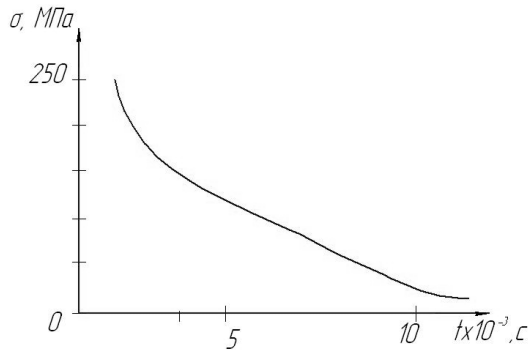


Рис. 7. Изменение сопротивления деформации в процессе сварки

Расчет деформационных характеристик процесса проводят только для стержня (рис. 8), так как плоская деталь заметной деформации не претерпевает. По данной схеме выделяется осаживаемая часть стержня в виде цилиндра с начальными размерами D_0 и H_0 , которые деформируются как при ковке между двумя плитами (электродами) – неподвижной 1 и подвижной 2.

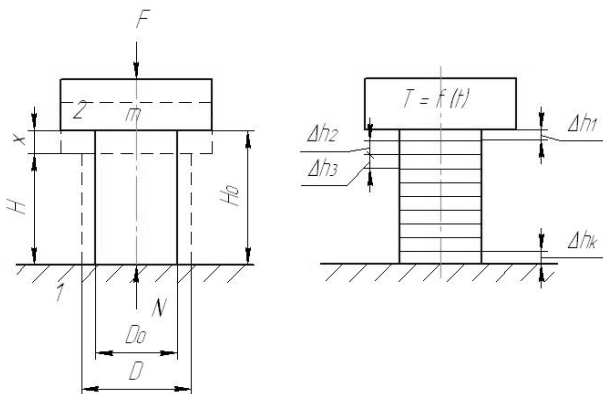


Рис. 8. Схема расчета деформационных и тепловых параметров процесса сварки

Сила сжатия P создается прижимным механизмом, имеющим совместно с электродным узлом и гибким токоподводом массу m . Масса самого стержня (привариваемого электрода) весьма мала и ею можно пренебречь в сравнении с массой m .

Степень деформации ϵ и скорость деформации u в данной системе определяются по формулам:

$$\epsilon = \frac{H_0 - H}{H_0} = \frac{z}{H}; \tag{18}$$

$$u = \frac{\dot{z}}{H} = \frac{\dot{z}}{H_0 - z}. \tag{19}$$

Значение скорости \dot{z} и перемещения z подвижного электрода с приведенной массой m находятся из уравнения движения

$$m\ddot{z} = P - N, \tag{20}$$

где N – реакция свариваемых материалов.

Рассмотренные в [4] модели контакта стержня и плиты показывают, что в свариваемых контактах только в редких случаях получается равномерное распределение напряжения сжатия. Неравномерность же распределения определяется формой деталей и механическими свойствами металла при температурах сваривания.

Теория пластических деформаций показывает, что средние действующие напряжения сжатия, при которых металл течет, определяются равенством:

$$\sigma = \sigma_{сд} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{S}{pH} \right), \tag{21}$$

где S – площадь сечения сжимаемой детали; p – периметр сечения; H – высота, в начальный момент $H = H_0$.

Расчетная величина реакции свариваемых деталей находится согласно выражению

$$N_p = \sigma_{сд} S \left(1 + \frac{2}{3} \frac{S}{pH} \right). \tag{22}$$

При этом входящие значения S , p , H или, в случае круглого стержня, его диаметр D определяются из условия постоянства объема осаживаемого стержня до и после осадки.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенного анализа объекта контроля и литературных источников выявлены основные проблемы обеспечения качества сварных соединений при КТС. Разработана структурная схема гибридной интеллектуальной системы контроля качества конденсаторной Т-образной сварки.

Предложена математическая модель термомодеформационных процессов конденсаторной Т-образной сварки, учитывающая все виды тепловых и механических составляющих вводимой энергии при образовании Т-образного сварного соединения.

Разработанная математическая модель адекватна реальному процессу и может быть использована для формирования обучающей выборки для ИНС, входящей в гибридную интеллектуальную систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Атрощенко В. В., Тэфанов К. В.** О совершенствовании систем автоматизированного контроля процесса конденсаторной Т-образной сварки // Сварка. Контроль. Реновация: тр. 6-ой науч.-техн. конф. Уфа, 2006.

2. Автоматический контроль процесса контактной микросварки по изменению силы сжатия деталей / Р. Б. Рудзит [и др.] // Автоматическая сварка. 1978. № 11.

3. **Дюдин В. Н., Строев В. И.** Моделирование термодформационных циклов сварки сопротивлением Т-образных соединений // Сварочное производство. 1986. № 9.

4. **Иванов Н. И.** Анализ методов автоматического управления процессом контактной сварки Т-образных соединений малогабаритных деталей // Сварочное производство. 2003. № 8.

5. Оценка качества контактной точечной сварки с помощью нейронных сетей / Б. Е. Патон [и др.] // Автоматическая сварка. 1998. № 12.

6. **Колесников А. В.** Проблемно-структурная технология разработки гибридных интеллектуальных систем. М., 2000.

7. Архитектура гибридной системы управления мобильного робота / А. В. Гаврилов [и др.] // Научный вестник НГТУ. 2004. № 2.

8. **Гаврилов А. В., Новицкая Ю. В.** Гибридные интеллектуальные системы. М., 2003.

9. **Кочергин К. А.** Сварка давлением. Л.: Машиностроение, 1972. 216 с.

10. **Иванов Н. И.** Расчетно-графический метод определения амплитуды нарастающего усилия механизма сжатия для контактной сварки Т-образных соединений // Сварка и родств. технол. в машиностр. и электрон. 2001. № 3. С. 98–101.

ОБ АВТОРАХ



Атрощенко Валерий Владимирович, проф. каф. ОиТСП. Дипл. инженер по электромех. (УГАТУ, 1974). Д-р техн. наук по автоматизир. технологич. процессам электрообработки металлов (УГАТУ, 1991). Иссл. в обл. автоматизации и автоматизации сварочн. производства, прогрессивн. методов сварки.



Тэфанов Валерий Николаевич, доц. той же каф. Дипл. инженер по электрон. технике (УГАТУ, 1977). Канд. техн. наук по машинам и технолог. свароч. производства (ЛПИ, 1988). Иссл. в области автоматизац. и теории, технол. и оборуд. сварочн. производства, упр. параметрами дугов. и контактн. сварки.



Тэфанов Кирилл Валерьевич, ассистент. Дипл. инж. по автоматизир. системам обработки инф-ции и упр-я (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем управления.