

УДК 621.791.763.1

В.П. Березиенко, д-р техн. наук, проф., С.М. Фурманов, Т.И. Бендик

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ ЛИСТОВЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Разработана методика моделирования термомеханического процесса контактной рельефной сварки, отличающаяся от известных тем, что позволяет осуществлять перераспределение сварочного усилия и теплового потока при модификации контактных поверхностей, учитывает скрытую теплоту фазовых переходов. По результатам математического моделирования проведена оценка влияния основных параметров режима рельефной сварки на кинетику формирования соединений из листовых низкоуглеродистых сталей.

Контактная рельефная сварка является одним из высокопроизводительных процессов, позволяющим одновременно добиться значительного снижения себестоимости продукции. Она характеризуется широким многообразием типов получаемых сварных соединений и находит применение в приборостроении, сельхозмашиностроении, тракторостроении и автомобилестроении. Ее отличают высокая производительность, гибкость и маневренность процесса, относительно низкая стоимость и высокая стойкость электродов. Однако применение контактной рельефной сварки во многих случаях ограничено из-за нестабильности прочностных характеристик соединений [1].

Одним из направлений повышения качества сварных соединений является научно обоснованный выбор размеров и формы рельефов, а также параметров термомеханического цикла сварки на базе математического моделирования процесса.

Известен ряд исследований, основанных на математическом моделировании процессов сварки [2...5]. Они посвящены изучению различных аспектов контактной точечной и рельефной сварки, таких как образование остаточных напряжений, рост литого ядра, особенности конструкции и износ электродов, влияние изменения высоты рельефов на процесс формирования ядра и др.

Исходя из анализа существующих разработок по моделированию процесса контактной точечной и рельефной сварки, нами сформулированы следующие основные требования, предъявляемые к модели: необходимость осуществления совместного термомеханического анализа, учет изменения плотности тока и распределения давления на контактной поверхности при изменении геометрии модели, модификация контактных поверхностей, статистическое моделирование начальных и конечных выплесков.

Для моделирования сварочных процессов методом конечных элементов применён коммерческий пакет общего назначения MSC.Marc, который обладает рядом дополнительных возможностей для исследования процессов сварки: осуществление совместного термомеханического анализа, адаптация разбивки конечно-элементной модели в процессе расчета, наличие расширенной библиотеки элементов (157 типов), позволяющей создавать любую геометрию моделируемого объекта, новые опции для создания контактных поверхностей.

При реализации пошагового совместного анализа, блок-схема которого представлена на рис. 1, нами вначале производился ввод данных для построения геометрии математической модели и задание свойств материалов, зависящих от температуры и граничных условий.

Распределение температуры, полученное из температурного расчета для некоторого шага времени, являлось тепловой нагрузкой для последующего механического расчета. Эти обновляющиеся процедуры повторялись с определенным приращением

времени (шагом), пока полный цикл сварки не был закончен.

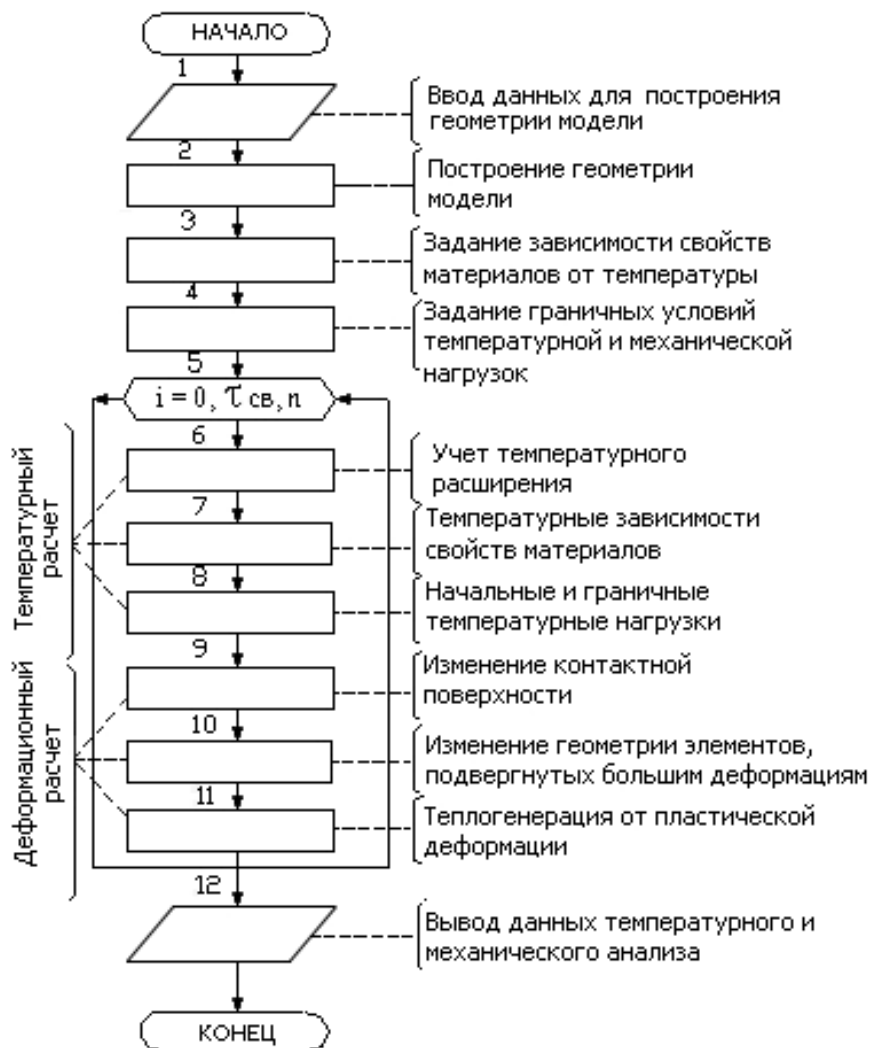


Рис. 1. Блок-схема процедуры совмещенного анализа

При решении тепловой задачи для осесимметричной модели рельефной сварки использовали уравнение теплопроводности Фурье, связывающее изменение температуры во времени и пространстве со свойствами среды. При условии, что теплоёмкость и плотность материала зависят от температуры, оно имеет следующий вид [2, 5, 7]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\gamma C T) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(K \frac{\partial T}{\partial r} \right) + K \frac{\partial T}{r \partial r} + Q,$$

где T – температура, °C; τ – время протекания процесса, с; r, z – координаты полярной системы координат, м; γ – плотность материала, кг/м³; C – удельная теплоёмкость, Дж/(кг · °C); K – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C); Q – количество тепловой энергии, которое выделяется в единицу времени в элементарном объеме, связанное с прохождением сварочного тока через электрическое сопротивление деталей и контактов, Дж/(м³·с).

Физическую нелинейность, связанную с упругопластическими деформациями и нестационарным температурным полем, описывали с использованием теории неизо-

термического пластического течения, согласно которой приращение полной деформации определяется суммой [7]:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} d\varepsilon^T,$$

где ε_{ij}^e и ε_{ij}^p – компоненты тензора упругой и пластической составляющих полной деформации соответственно; ε^T – температурная деформация; δ_{ij} – символ Кронекера, который определяется следующим выражением:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j; \\ 0, & \text{если } i \neq j; \end{cases} \quad (i, j = r, z, \theta).$$

На рис. 2 показано разбиение осесимметричной модели электрод - детали - электрод на четырехузловые изопараметрические конечные элементы. Густота сетки разбиения не одинакова по сечению. Обусловлено это тем, что в области границы литого ядра имеют место большие градиенты температуры и напряжений, поэтому в указанной области необходима повышенная частота разбиения модели.

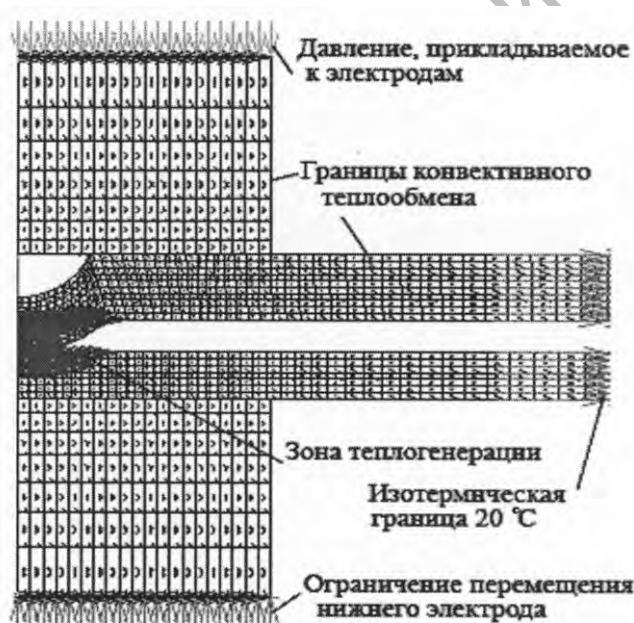


Рис. 2. Разбиение осесимметричной модели электрод - детали - электрод на конечные элементы

В расчетах учитывались теплофизические и механические свойства, зависящие от температуры и структурных превращений. Однако высокотемпературные (примерно от 900 °С и до температуры плавления) механические свойства (предел текучести, модуль упругости, температурный коэффициент линейного расширения) задавались исходя из условий сходимости вычислительного процесса [3...5].

На рис. 3 представлена кинетика образования соединения при сварке листов из низкоуглеродистой стали Ст. 3 толщиной 3+2 мм с использованием круглого рельефа. В течение времени предварительного сжатия контакт между деталями устанавливается по вершине рельефа, который частично сминается и частично вдавливается в плоский лист. Через 0,1 с с начала прохождения сварочного тока начинается интенсивное смятие рельефа (рис. 3, а), связанное с нагревом металла до температуры разупрочнения, и

наблюдается значительный рост диаметра контакта. Затем в центре контакта начинает формироваться литое ядро (рис. 3, б), а рост диаметра контакта замедляется из-за температурного расширения деталей. Далее размеры литой зоны растут и ко времени протекания сварочного тока $\tau_{св} = 0,7$ с в контакте формируется расплавленное ядро диаметром 8 мм.

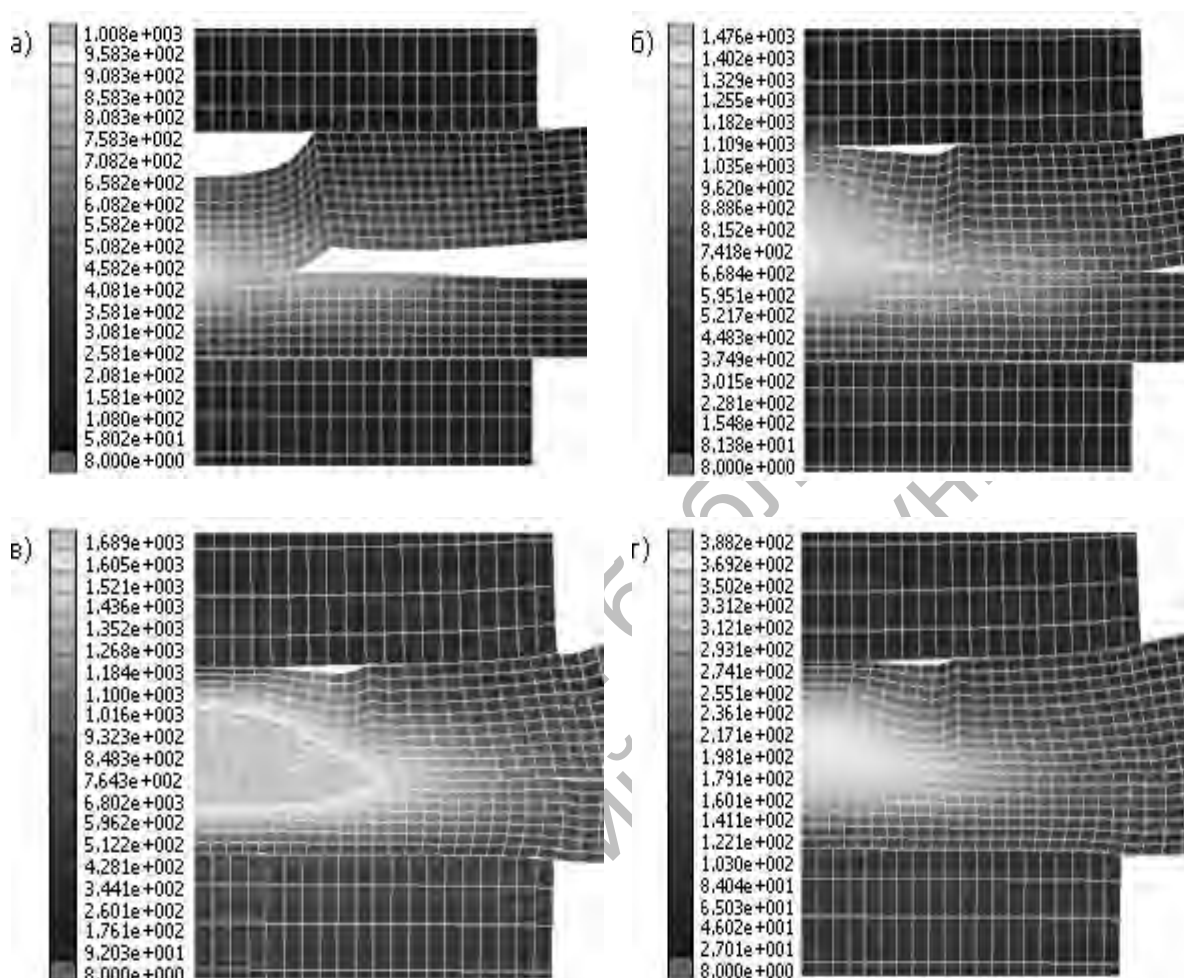


Рис. 3. Кинетика образования соединения с круглым рельефом на верхней детали: а - время $\tau_{св} = 0,4$ с; б - время $\tau_{св} = 0,5$ с; в - время $\tau_{св} = 0,7$ с; г - время после выключения сварочного тока $\tau = 0,3$ с

Разработанная нами конечно-элементная модель процесса рельефной сварки листов из низкоуглеродистой стали применялась для исследования влияния параметров режима сварки (усилия на электродах, сварочного тока, время протекания и модуляции сварочного тока, а также геометрических характеристик рельефов и др.) на процесс образования сварного соединения. Определены основные параметры режима сварки, оказывающие влияние на кинетику формирования качественных сварных соединений.

Произведенная оценка адекватности предложенной математической модели показала ее значимость и адекватность, коэффициент корреляции теоретических и экспериментальных данных составил 0,91.

Результаты математического моделирования использованы нами для определения оптимальных параметров режима сварки стали Ст. 3 толщиной от 0,5 до 6 мм.

Выводы

1. С целью повышения стабильности прочностных характеристик сварных соединений разработана методика моделирования термомеханического процесса контактной рельефной сварки с использованием круглых рельефов, которая отличается от известных тем, что позволяет осуществлять перераспределение сварочного усилия, теплового потока и плотности тока при модификации контактных поверхностей, учитывает скрытую теплоту фазовых переходов и теплогенерацию, вызванную пластической деформацией.

2. Произведена оценка влияния основных параметров режима рельефной сварки на кинетику формирования соединений, определены условия получения качественного соединения с образованием литого ядра заданных размеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гилевич, В. А.** Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Л. : Машиностроение, 1976. – 152 с.
2. **Березиенко, В. П.** Совершенствование технологии контактной точечной и рельефной сварки / В. П. Березиенко, В. А. Попковский, С. Ф. Мельников. – Мн. : Выш. шк., 1990. – 120 с.
3. **Прохоров, А. Н.** Математическая модель процесса контактной точечной сварки / А. Н. Прохоров, А. А. Чакалев // Сварочное производство. - 1991. - № 4. - С. 39 – 43.
4. **Nied, H. A.** The finite element modeling of the resistance spot welding / H. A. Nied // Welding Journal. - 1984. - № 63 (4). - P. 123-132.
5. **Li, M. V.** Modeling of contact resistance during resistance spot welding process / M. V. Li, P. Dong // Proc. 7th int. conf. on Computer tech. in Welding. Ed. T. Siewert. NIST Special Publication 923, United States Department of Commerce. - 1997. - P. 423-435.
6. **Sun, X.** Modeling of projection welding processes using coupled finite element analyses / X. Sun // Welding Journal. - 2000. - № 79 (9). - P. 244-251.
7. **Можаровский, Н. С.** Приложение методов теории пластичности и ползучести к решению инженерных задач машиностроения: учебник в 2 ч. Ч. 1. Теория пластичности и ползучести в инженерном деле / Н. С. Можаровский. – Киев : Вища шк., 1991. – 264 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 31.10.2005

V.P. Bereziienko, S.M. Furmanov, T.I. Bendik
About features of mathematical modelling
of the contact projection welding process
of the sheet low-carbon steels
Belarusian-Russian University

Has been developed the technique of the modelling of the contact projection welding process distinguished from known themes, that allows to realize redistribution of weld pressure and heat flow with updating of contact surfaces, takes into account the latent heat of phase transitions. By the results of mathematical modeling has been evaluated the influence of the main welding parameters on the kinetics of the formation of welded joints.