DOI 10.35694/YARCX.2021.54.2.014

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТОЧЕЧНОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

А. С. Угловский (фото)

канд. техн. наук, доцент кафедры электрификации
И. М. Соцкая

канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой технического
сервиса

Е. В. Шешунова

канд. техн. наук, доцент, декан инженерного факультета
ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, г. Ярославль

*Точечная контактная
сварка, сварной
стержень, форма
электрода,
моделирование,
численный анализ*

*Spot contact welding,
weld rod, electrode shape,
simulation, numerical
analysis*

На протяжении многих лет точечная контактная сварка является надёжной и популярной технологией соединения, прежде всего в автомобильной промышленности. Благодаря своим свойствам технология обеспечивает получение высококачественных швов в короткие сроки, значительно повышая эффективность производства. Использование передовых вычислительных инструментов значительно снижает затраты на создание прототипов и исключает дорогостоящие испытания, которые из-за непрерывности производства трудно или даже невозможно провести. Существенно повлиять на качество и прочность сварных соединений позволяет использование численного анализа, с помощью которого можно моделировать размеры и форму сварных швов.

Цель рассмотрения численного метода заключалась в получении подробных данных, позволяющих оценить проведение сварочного процесса: изменение объёма сварного шва, радиуса сварного шва, радиуса зоны термического влияния.

При анализе процесса контактной сварки изучались электрические, термические, металлургические и механические явления, происходящие при сварке.

Процесс контактной сварки делится на три основных этапа: сжатие, протекание сварочного тока, формирование сварных швов и проковка сварного шва во время охлаждения (рис. 1). Контактная сварка обычно используется при соединении листов, толщина которых ограничивается диапазоном от 0,5 до 3 мм. При сварке два электрода из медного сплава подают электрический ток и оказывают сжимающее усилие на свариваемые элементы. Вышеупомянутый процесс приводит к образованию сварного шва в результате плавления материала на границе стыка соединяемых элементов. Подвод тепла к стыку зависит от величины тока, протекающего через зону сварки, и от времени протекания тока. Эти два параметра регулируются в зависимости от свариваемого материала, толщины листов и типов электродов, используемых в процессе сварки.

Рисунок 1 – Отдельные этапы процесса точечной контактной сварки

Качество сварных соединений зависит, прежде всего, от силы электродного усилия и времени протекания сварочного тока. В последнее время численный анализ стал очень популярным при разработке современных технологий сварки. Использование численных анализов позволяет точно определить влияние силы сжатия и времени протекания сварочного тока на распределение температуры в течение всего процесса. Кроме того, наблюдение за влиянием остальных параметров, включая свойства материала или способ крепления, можно использовать для контроля за распределением напряжений и деформаций.

Рассмотрим точечную контактную сварку в числовом формате [1]. Обозначенные на рисунке 2 явления взаимосвязаны. Следовательно, аналогично численному анализу сварочных процессов, необходимо выполнять как термометаллургические, так и механические расчёты. В соответствии со схемой, представленной на рисунке 2, четыре основных явления, ранее упомянутые в отношении процесса точечной контактной сварки, учитываемые программой SYSWELD вместе с их взаимосвязями, представляют собой следующие проблемы:

- 1) электрокинетические;
- 2) связанные с переносом тепла;

Рисунок 2 – Корреляция между электрокинетическими явлениями, переносом тепла, металлургическими и механическими явлениями при точечной контактной сварке [1]

3) металлургические преобразования, происходящие при нагреве и охлаждении свариваемых элементов;

4) относящиеся к напряжениям и деформациям в свариваемых элементах.

Электрические явления и передача тепла в анализируемой ограниченной области сочетаются с явлением диссипации энергии за счёт эффекта Джоуля и могут быть описаны с помощью электрокинетической модели:

$$\operatorname{div}(\mu \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}(V)) = 0, \quad (1)$$

где μ – электрическая проводимость.

С учётом граничного условия Дирихле или Неймана и теплопроводности, описываемой законом Фурье, перенос тепла в однородном материале определяется уравнением теплопроводности, содержащим эффект Джоуля как внутренний источник тепла [1; 2; 3]:

$$\operatorname{div}(\lambda \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}(T)) + \overrightarrow{\operatorname{grad}}(V) \cdot \mu \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}(V) = \frac{\delta H}{\delta t} \quad (2)$$

где λ – теплопроводность;

H – объёмная энтальпия.

Также следует отметить, что электропроводность μ зависит от температуры.

Если свариваемый материал претерпевает металлургические процессы, также необходимо учитывать корреляцию между переносом тепла и металлургическими преобразованиями. Вышеупомянутые соотношения следующие:

1) металлургические преобразования в зависимости от предыдущих изменений температуры – так называемой термической «истории»;

2) свойства материала, включая тепловые, в зависимости от отдельных металлургических фаз;

3) металлургические превращения, сопровождающиеся скрытым теплом, существенно меняющим распределения температурных полей.

С точки зрения численного анализа, распределения металлургических фаз представляют собой дополнительные переменные состояния, изменения которых можно описать с помощью дифференциальных уравнений во времени.

Выявление корреляций между металлургическими преобразованиями и свойствами материала – теплопроводностью, плотностью, энтальпией – предполагает использование линейных уравнений для каждой фазы отдельно. Выделением тепла в результате рассеивания можно пренебречь из-за очень низких значений коэффициентов трансформации, вызванных процессом сварки, особенно по сравнению с потерями энергии, обусловленными эффектом Джоуля. В термометаллургическом ана-

лизе не учитывается конвекция жидкого металла в сварном ядре и принимается увеличение теплопроводности.

Подобно моделированию сварочных процессов, анализ кинетики изотермических превращений обычно включает использование уравнения Джонсона – Мела – Аврами [4].

Однако, что касается типичных сварочных процессов, характеризующихся значительными скоростями нагрева и охлаждения, можно также использовать модель, предложенную Леблондом и Дево, выраженную в виде следующей зависимости [5]:

$$\dot{p} = \frac{\bar{p}(T) - p}{\tau(T)}, \quad (3)$$

где p – соотношение образовавшейся фазы; $p(T)$ и $\tau(T)$ – параметры, которые при заданной температуре «Т» представляют собой фазовые отношения после времени нагрева и времени выдержки. Для каждого преобразования указанные выше значения корректируются, чтобы соответствовать непрерывному охлаждению.

В отношении бездиффузионного превращения, то есть мартенситного превращения, используется уравнение Койстинена – Марбургера:

$$p(T) = p_A(1 - e^{-b \cdot (Ms - T)})$$

$$\text{для } T \leq Ms, \quad (4)$$

где p_A – количество превращённого аустенита; Ms – температура в начале мартенситного превращения; b – параметр, соответствующий превращению, происходящему при изменении температуры.

Корреляция между тепловыми и механическими явлениями имеет большое значение при моделировании, поскольку необходимо учитывать термические напряжения, изменения объёма, пластичность, вызванную металлургическим преобразованием. Механический анализ основан на стандартных уравнениях, описывающих статическое равновесие. Важно отметить, что при моделировании процесса сварки, выполняемого плоскими электродами, вышеуказанный анализ можно отделить от термометаллургического анализа. Это происходит из-за того, что при термометаллургическом анализе площадь контакта между электродами и свариваемым материалом такая же, как площадь механического контакта.

Методика

Проведём анализ процесса точечной контактной сварки. Модули SYSWELD программы Spot Weld Mesh и Spot Weld Advisor используются для подготовки и определения вычислительной модели. Первый модуль содержит инструмент, позволяющий создавать параметрические модели сварных

соединений, значительно ускоряющий создание расчётной модели. В этом модуле пользователь должен указать количество свариваемых листов/пластин, а также их толщину. Пользователь может решить, использовать ли заданную геометрию электродов или создать собственную геометрическую модель (рис. 3).

Рисунок 3 – «Ассистент по точечной сварке»

Для демонстрации возможностей современного аналитического программного обеспечения с помощью программы SYSWELD была создана осесимметричная 2D-модель двух стальных листов, подвергнутых точечной контактной сварке (рис. 4). Оба листа толщиной 1,0 мм были изготовлены из холоднокатаной низкоуглеродистой стали DC04

Рисунок 4 – Расчётная модель точечной сварки сопротивлением двух листов

(EN 10130). При анализе использовалась сварка электродами плоской рабочей поверхностью (рис. 4).

В модуле «Ассистент по точечной сварке» (рис. 5) пользователь сначала определяет тип

материала, параметры процесса, типы электродов и условия сопротивления соединения, а затем выполняет вычисления. Сразу после завершения расчётов пользователь получает информацию о форме сварного шва, развитии зоны плавления,

Частота сварочного тока
 Электродная (сжимающая) сила
 Количество циклов сжатия (время сжатия) $25/50 \text{ Гц} = 0,5 \text{ с}$
 Количество циклов тока (время сварки) $20/50 \text{ Гц} = 400 \text{ мс}$
 Сварочный ток: 9 кА

Рисунок 5 – Окно модуля «Ассистент по точечной сварке»: настройка параметров процесса сварки

радиусе зоны плавления и радиусе зоны термического влияния. Пользователь также может просмотреть диаграмму параметров Weld Process Check, определяющую качество процесса по вытеснению жидкого металла (рис. 6–10). Время сварки составляет 400 мс, что видно по диапазону графиков (рис. 6–9).

Параметры процесса точечной сварки имеют особое значение. Небольшое изменение одного параметра повлияет на все остальные. Они будут определять качество сварных швов. Их соответствующее сочетание обеспечит прочное соединение и хорошее качество сварки. Параметры точечной сварки включают:

Рисунок 6 – Сварной шов, полученный с помощью электродов с плоским наконечником (минимальная температура 39,29°C; максимальная температура 2305,4°C)

Рисунок 7 – Изменение объема сварного шва из жидкого металла при точечной контактной сварке, выполненной с использованием плоского наконечника электрода (максимальное значение объема 54 мм³)

Рисунок 8 – Изменение радиуса сварного шва из жидкого металла при точечной контактной сварке, выполненной с использованием плоского электрода (максимальное значение радиуса 3,28 мм)

Рисунок 9 – Изменение радиуса зоны термического влияния при точечной контактной сварке выполняется с помощью плоского электрода (максимальное значение радиуса 3,90 мм)

- 1) электродную силу;
- 2) диаметр контактной поверхности электрода;
- 3) время сварки;
- 4) время выдержки;
- 5) сварочный ток.

Результаты исследования

Основываясь на научной статье [6], можно вывести зависимости параметров точечной сварки низкоуглеродистой стали толщиной до 3,2 мм:
 диаметр наконечника электрода $D = 2,54 + (d_1 + d_2)$ мм;

Рисунок 10 – Изменения в параметре проверки процесса точечной контактной сварки, выполняемой с использованием плоского наконечника электрода (максимальное значение 0,81)

время сварки $t = 10 \cdot (d_1 + d_2)$ циклов;
сварочный ток $I = 3937 \cdot (d_1 + d_2)$ А;
электродная сила $F_e = 1500 \cdot (d_1 + d_2)$ Н,
где d_1 – толщина первой пластины, мм (1 мм);
 d_2 – толщина второй пластины, мм (1 мм).

Помимо данных, доступных непосредственно из модуля «Ассистент по точечной сварке», пользователь также может получить доступ к традиционным данным, рассчитанным для всего процесса сварки.

Выводы

Таким образом, рассмотренный метод позволяет исключить дорогостоящие лабораторные испытания, которые, особенно в случаях испытаний производственного процесса сварки, часто трудно или даже невозможно провести, поскольку они влекут за собой переоснащение и перепрограмми-

рование станций производственных линий. Кроме того, представленный выше подход может повысить производительность и минимизировать количество возникающих дефектов и недостатков.

Авторами выведены зависимости параметров точечной сварки низкоуглеродистой стали толщиной до 3,2 мм.

Вышеупомянутый подход к проектированию современных и сложных конструктивных элементов транспортных средств и частей машин не только оправдан, но и необходим в ближайшем будущем из-за всё более высоких требований к качеству, более сложных технологий соединения, а также высоких эксплуатационных свойств новых материалов. Всё это требует высокой точности при настройке параметров процесса сварки и может быть получено с помощью вычислительных модулей SYSWELD.

Литература

1. Deng, D. Numerical simulation of welding distortion in large structure / D. Deng, H. Murakwa, Liang and W. Maropoulos – Text : electronic // Computer methods in applied mechanical and engineering. – 2007. – V. 196. – 4613–4627.
2. Винокуров, В. А. Григорьянц, А. Г. Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. – Москва : Машиностроение, 1984. – 284 с. – Текст : непосредственный.
3. Feulvarch, E. Resistance spot welding simulation: a general finite element formulation of electrothermal contacts conditions / E. Feulvarch, V. Robin, J. M. Bergheau. – Text : electronic // J. of Materials Processing Technology. – 2004. – 153–154:436–441.
4. Fisher, C. R. Simulation of Weld Mechanical Behavior to Include Welding-Induced Residual Stress and Distortion: Coupling of SYSWELD and Abaqus Codes / C. R. Fisher, K. Nahshon. – Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, West Bethesda, MD, USA, 2015. Report No. NSWCCD-61-TR-2015/31. – Text : electronic.

5. Zhang, W. Design and implementation of software for resistance welding process simulations / W. Zhang. – Text : electronic // Society of Automotive Engineers, Technical Paper 01-0978. – 2003. – V. 105–113. – DOI: 10.4271/2003-01-0978.

6. Mehra, K. Spot Welding Electrode Analysis: A Review / K. Mehra, A. Pushkar. – Text : electronic // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2018. – Vol. 7, Issue 11. – ISSN 2278-0181.

References

1. Deng, D. Numerical simulation of welding distortion in large structure / D. Deng, H. Murakwa, Liang and W. Maropoulos – Text : electronic // Computer methods in applied mechanical and engineering. – 2007. – V. 196. – 4613–4627.

2. Vinokurov, V. A. Grigor'yanc, A. G. Teoriya svarochnykh deformacij i napryazhenij / V. A. Vinokurov, A. G. Grigor'yanc. – Moskva : Mashinostroenie, 1984. – 284 s. – Tekst : neposredstvennyj.

3. Feulvarch, E. Resistance spot welding simulation: a general finite element formulation of electrothermal contacts conditions / E. Feulvarch, V. Robin, J. M. Bergheau. – Text : electronic // J. of Materials Processing Technology. – 2004. – 153–154:436–441.

4. Fisher, C. R. Simulation of Weld Mechanical Behavior to Include Welding-Induced Residual Stress and Distortion: Coupling of SYSWELD and Abaqus Codes / C. R. Fisher, K. Nahshon. – Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, West Bethesda, MD, USA, 2015. Report No. NSWCCD-61-TR-2015/31. – Text : electronic.

5. Zhang, W. Design and implementation of software for resistance welding process simulations / W. Zhang. – Text : electronic // Society of Automotive Engineers, Technical Paper 01-0978. – 2003. – V. 105–113. – DOI: 10.4271/2003-01-0978.

6. Mehra, K. Spot Welding Electrode Analysis: A Review / K. Mehra, A. Pushkar. – Text : electronic // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2018. – Vol. 7, Issue 11. – ISSN 2278-0181.