



10.35694/YARCX.2020.51.3.010

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ SORPAS®

И.М. Соцкая

к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технического сервиса
А.С. Угловский (фото)

к.т.н., доцент кафедры электрификации
ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, г. Ярославль

*Моделирование,
оптимизация,
контактная сварка,
программа SORPAS®*

*Simulation, optimization,
contact welding, SORPAS®
software*

Уже более 150 лет контактная сварка используется в технике, особенно в автомобильной промышленности, сельскохозяйственном машиностроении, изготовлении каркасных строительных конструкций, массовом производстве сварных труб различного назначения, кузовном ремонте. Её отличает высокая производительность процесса, простота устройства машин для сварки, незначительный расход электроэнергии на нагрев детали. Несмотря на то, что технология известна уже много лет, она продолжает сталкиваться с проблемами, например, связанными с новыми материалами (высокопрочные стали и алюминиевые сплавы), решениями в отношении компонентов сварочных аппаратов (сервомеханические приводы) или точечной сварки большого числа листов (особенно сложных, если листы отличаются по толщине и имеют различные сорта материала, например, низкоуглеродистые и низколегированные стали).

Соединение тонкостенных металлических элементов, обычно выполняемое с использованием технологий контактной сварки, часто сталкивается с проблемами, связанными с качеством соединения, стабильностью процесса (например, вытеснение жидкого металла) или более длительным сроком службы электродов.

Моделирование процессов сварки предлагает не только возможность лучшего понимания проблем, связанных с различными материалами и их свариваемостью, но также позволяет оптимизировать параметры процесса сварки. В условиях эксперимента получение таких знаний требует многочисленных сварочных и разрушающих испытаний, которые часто отнимают много времени и стоят дорого.

Что касается сварочных процессов, преимущества численного моделирования включают в себя снижение затрат и времени на разработку, технологические испытания и оптимизацию процесса. Кроме того, расчёты методом конечных элементов (МКЭ, или FEM) позволяют более адекватно использовать процедуры оптимизации, определяя допустимое поле технологических параметров, гарантирующих получение соединений хорошего качества.

С 1980-х годов FEM-расчёты использовались для моделирования и прогнозирования результатов сварочных процессов в зависимости от конкретных материалов и параметров [1]. Удобство расчётов FEM было подтверждено многими теоретическими и экспериментальными тестами. Положительные результаты проверки привели к растущему использованию расчётов FEM в практических применениях, что, в свою очередь, повлекло за собой растущий спрос на оптимизацию процессов контактной сварки в промышленности, в частности, в отношении определения условия наиболее благоприятной начальной сварки.

Метод конечных элементов (FEM) в программном обеспечении SORPAS® используется для построения численных моделей, позволяющих моделировать, в частности, процессы контактной сварки. Более чем десятилетние испытания и промышленное использование, постоянное развитие программного обеспечения привели к получению удовлетворительной точности и надёжности численных моделей, данных, касающихся материалов, а также интерфейса и динамики сварочного оборудования. Кроме того, система была улучшена благодаря действиям, направленным на автоматизацию подготовительных процедур и более быстрое моделирование с помощью наиболее удобного графического интерфейса пользователя и дисплея для представления результатов. Высокоточное представление реальных процессов, предлагаемых SORPAS®, возможно благодаря комбинированным электрическим, тепловым и механическим расчётам [1].

В системе SORPAS® метод конечных элементов, как было отмечено выше, используется для моделирования процессов контактной сварки, которое выполняется для определения (испытания) свариваемости новых материалов путём прогнозирования результатов, возникающих в ходе использования конкретных базовых материалов, электродных материалов и параметров процесса сварки. Моделирование является основой для более сложных задач, связанных с оп-

тимизацией и проектированием сварочных процессов [2–5].

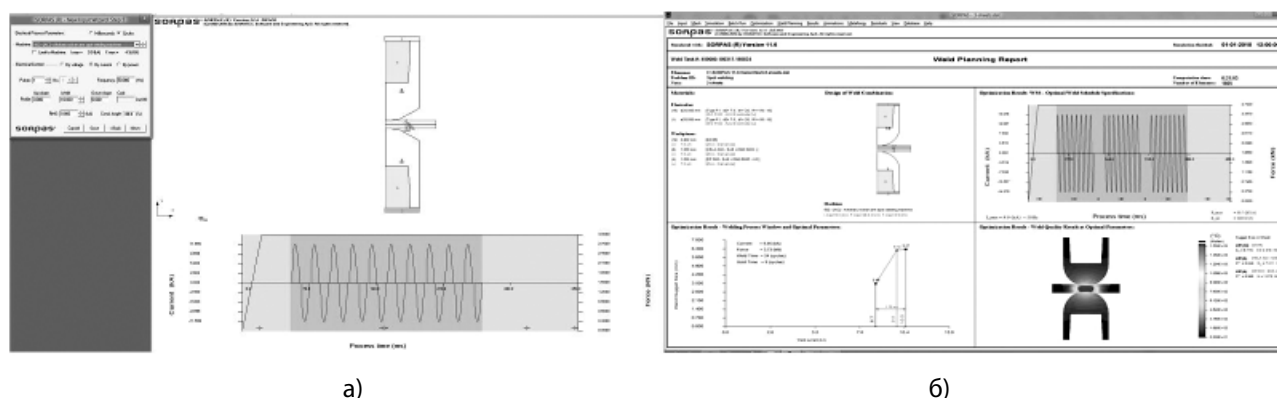
Удобный графический интерфейс представляет автоматические процедуры, позволяющие подготовить входные данные, ускорить построение модели, выполнить численные расчёты (моделирование), а также представить результаты сварочных процессов. После выполнения моделирования программа позволяет отображать кривые параметров динамического процесса в зависимости от времени (например, формы напряжения, тока, мощности и сопротивления, изменения силы и хода электрода, увеличения диаметра сварного шва и т. д.). В процессе сварки система обеспечивает визуализацию распределения температуры, тока, напряжения, твёрдости, а также деформаций и напряжений во всех материалах (элементах данной модели).

Из-за расположения (геометрии) двухсторонней точечной сварки в большинстве случаев возможно выполнение моделирования с использованием осесимметричной (2D) модели. По сравнению с 3D-моделью, использование упрощённой 2D-модели значительно сокращает время вычислений (расчёты длятся в среднем 30 минут вместо 10–20 часов), а также значительно снижает потребность в памяти для архивных данных.

На рисунке 1 представлен пример моделирования двухсторонней точечной сварки двух листов. В части 1а рисунка представлен графический интерфейс пользователя, используемый для подготовки входных данных, таких как свариваемые материалы, электроды и параметры сварочного процесса. На рисунке 1б представлен отчёт по моделированию, содержащий начальные условия и результаты моделирования, включая выбранные кривые параметров процесса и окончательный размер слепка сварного шва [1].

Резистивная сварка выполняется в различных конфигурациях, например, в качестве точечной сварки используют электроды, имеющие определённые формы, в качестве проекционной сварки, где площадь формирования сварного шва определяется выступами, а также в качестве стыковой сварки коротких замыканий стержней или секций.

Программа SORPAS® позволяет создавать модели в соответствии с вышеупомянутыми методами (рис. 2а–2в). Точечная сварка может выполняться в конфигурации двухсторонней сварки (рис. 3б) или односторонней точечной сварки (рис. 3а).



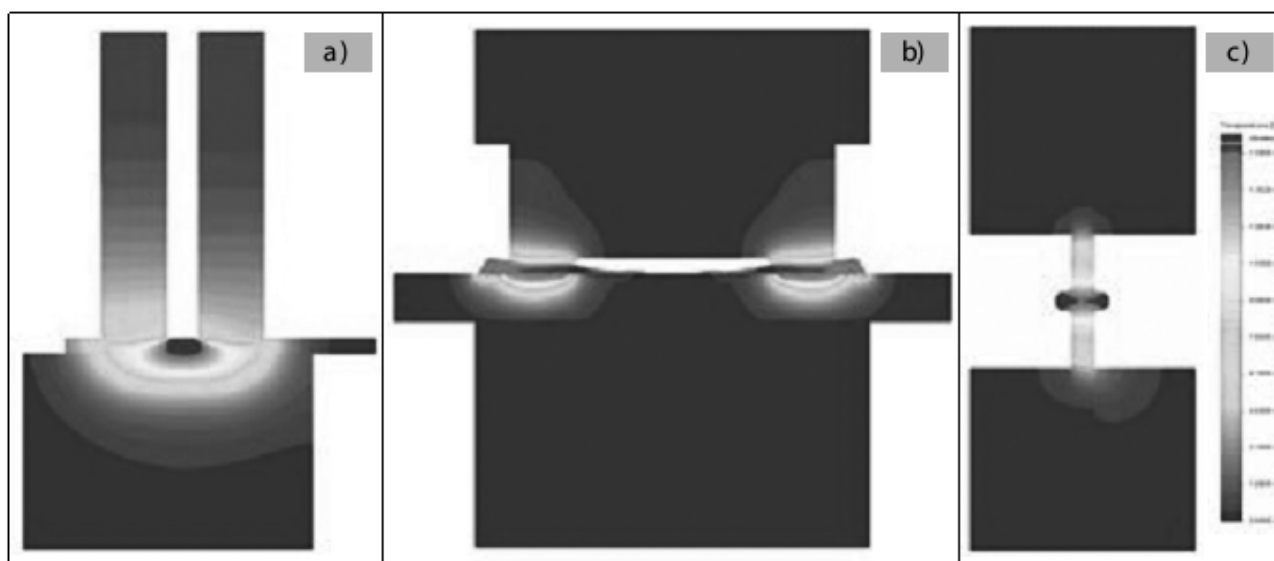
а) графический интерфейс для подготовки входных данных, касающихся свариваемых материалов, электродов и параметров процесса сварки; б) отчёт по моделированию, содержащий предварительно установленные (входные) параметры и ожидаемые результаты процесса сварки.

Рисунок 1 – Моделирование двухсторонней точечной сварки двух листов, выполненной с использованием системы SORPAS®

Результаты моделирования процесса были использованы для разработки автоматизированных процедур, позволяющих оптимизировать параметры процесса контактной сварки. Международный стандарт EN ISO 14327 содержит анализ свариваемости и информацию, касающуюся оптимизации контактной сварки, а также две диаграммы, представляющие кривую увеличения диаметра сварного шва и определение свариваемости (диапазон параметров сварки). Система SORPAS® позволяет автоматически определять диапазоны, включая пределы ожидаемого выброса и окно параметров процесса.

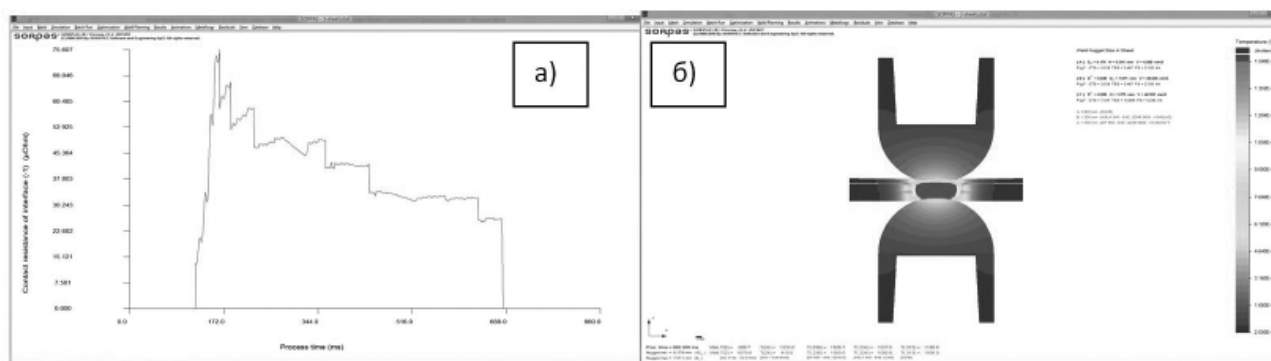
Кривая увеличения диаметра сварного шва может быть получена путём проведения серии сварочных испытаний и увеличения сварочного тока, а также путём измерения размеров сварных швов. В производственной практике вышеуказанные испытания являются трудоёмкими и дорогостоящими. Благодаря автоматизированным процедурам SORPAS® позволяет выполнять моделирование всех сварных швов вдоль кривой формирования сварного шва и получать информацию о возможном дефекте точечной сварки.

Аналогичным образом можно моделировать диапазон параметров, определяющих сварива-



а) точечная односторонняя сварка; б) проекционная сварка гаек; в) кольцевая стыковая сварка стержней.

Рисунок 2 – Примеры моделей контактной сварки



а) форма волны выбранного параметра (статическое сопротивление наклона) процесса со временем начала выталкивания и интенсивностью пласта; б) размер конечного сварного шва с площадью образования выталкивания.

Рисунок 3 – Моделирование выталкивания жидкого металла из ядра сварного шва с предполагаемым временем возникновения и интенсивностью выталкивания

емость, то есть путём моделирования сварных швов в пределах определённого диапазона сварочного тока и силы электрода, что позволяет определять окно параметров процесса сварки. Что касается первого диапазона изменения параметров (окно параметров – рис. 1а), то ток и время сварки изменяются, а сила между электродами остаётся неизменной. В случае второго диапазона изменения параметров (окно параметров – рис. 1б) ток и сила между электродами изменяются, а время сварки остаётся неизменным.

Программа содержит две встроенные опции, позволяющие выбрать систему электродной силы. Сила между электродами может быть выполнена двумя способами, то есть с использованием стандартного (пневматического или сервомеханического) силового устройства. Первый способ (использование пневматической силы) не требует подробного описания; настройка параметров идентична настройке сварочного аппарата. Необходимо принимать во внимание подходящее время начальной силы, основной силы и разделения электродов. Программа автоматически учитывает время задержки, возникающее в результате влияния использования пневматических элементов, то есть, прежде всего, размера цилиндра, на силу электрода.

Второй способ предполагает использование сервомеханической системы электродной силы, заключающейся в настройке скорости перемещения электрода. Такое решение позволяет контролировать движение электродов. Однако в таком случае сила между электродами является

совпадением взаимодействия скорости перемещения электрода и скорости нагрева зоны сварки, возникающей в результате протекания тока. Преимущества системы особенно полезны при проекционной сварке, требующей контролируемого перемещения электродов в зависимости от скорости пластификации проекции.

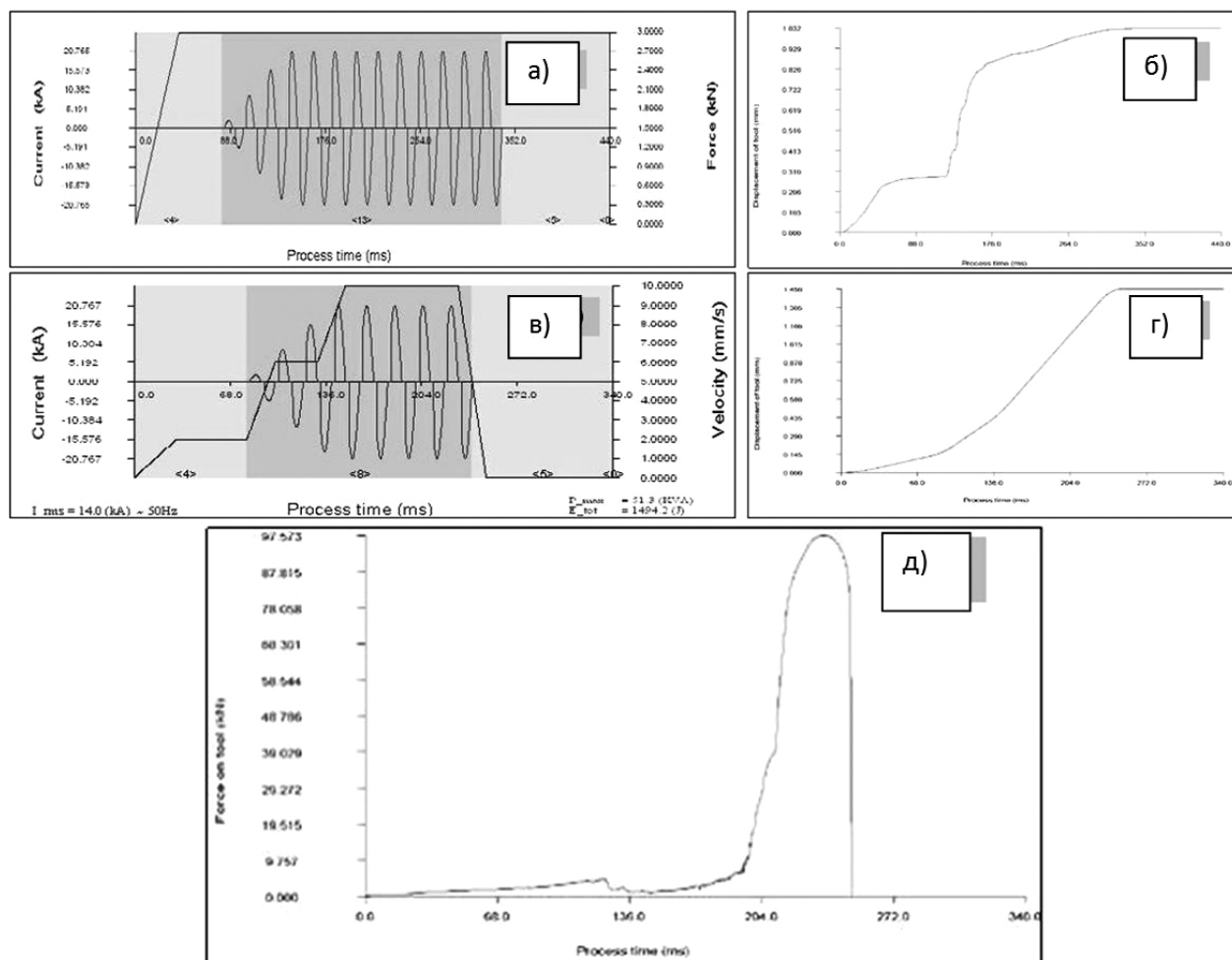
Пневматические системы также могут быть использованы при проекционной сварке, но окно параметров очень узкое по сравнению с сервомеханическими системами.

Примерный ход предварительно установленного усилия относительно пневматической системы представлен на рисунке 4а. На рисунке 4в представлена скорость перемещения электрода (в отношении сервомеханической системы), которая варьируется в зависимости от отдельных технологий.

Применение силы, создаваемой пневматическими системами, приводит, в конечном счёте, к неконтролируемому движению электродов (рис. 4б). В свою очередь, заданная скорость перемещения электрода, обеспечивающая контролируемое движение электродов (рис. 4г), приводит к силе электродов (рис. 4д).

Выводы

Численные расчёты очень полезны при оценке свариваемости новых материалов и оптимизации параметров сварочных процессов. Программа SORPAS® для моделирования процессов контактной сварки позволяет выполнять различные расчёты, начиная с простых осесимметричных моделей (2D).



- а) заданные параметры: сварочный ток и сила между электродами (пневматическая система);
 б) движение электродов, связанных с пневматической системой; в) заданные параметры: сварочный ток и скорость перемещения электрода (сервомеханическая система);
 г) результирующее движение электродов; д) результирующая сила между электродами.

Рисунок 4 – Предварительно заданные параметры и результаты расчёта МКЭ для проекционной сварки двух листов (толщиной 1 мм каждый) с точки зрения пневматического (а, б) и сервомеханического (в, г, д) электрода системы сил

Сложные графические опции программного обеспечения позволяют визуализировать данные в виде графических представлений (графиков/ сигналов связанных величин во время сварки) и величин, подвергаемых анализу. Программное

обеспечение является отличным инструментом для определения параметров начальной сварки, а также позволяет проводить глубокий анализ явлений, происходящих во время контактной сварки.

Литература

1. SORPAS. Simulation and optimization of resistance projection and spot welding processes // SORPAS-Denmark: SWANTEC Software and Engineering ApS, 2016. – 10 p.
2. Zhang, H. Resistance Welding: Fundamentals and Applications [Text] / H. Zhang, J. Senkara // Boca Raton: CRC Press, 2006. – 456 p.
3. Song, Q. Testing and Modeling of Contact Problems in Resistance Welding [Text] / Q. Song // Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, 2003. – 186 p.
4. Zhou, K. Study on effect of electrode force on resistance spot welding process [Text] / K. Zhou och L. Cai // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 116. – Nr. 8. – doi.org/10.1063/1.4893968.

5. Zhang, W. Design and Implementation of Software for Resistance Welding Process Simulations» [Text] / W. Zhang // Journal of Materials and Manufacturing. – 2003. – Vol. 112. – Nr. 5. – P. 556–564.

References

1. SORPAS. Simulation and optimization of resistance projection and spot welding processes // SORPAS-Denmark: SWANTEC Software and Engineering ApS, 2016. – 10 p.
2. Zhang, H. Resistance Welding: Fundamentals and Applications [Text] / H. Zhang, J. Senkara // Boca Raton: CRC Press, 2006. – 456 p.
3. Song, Q. Testing and Modeling of Contact Problems in Resistance Welding [Text] / Q. Song // Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, 2003. – 186 p.
4. Zhou, K. Study on effect of electrode force on resistance spot welding process [Text] / K. Zhou och L. Cai // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 116. – Nr. 8. – doi.org/10.1063/1.4893968.
5. Zhang, W. Design and Implementation of Software for Resistance Welding Process Simulations» [Text] / W. Zhang // Journal of Materials and Manufacturing. – 2003. – Vol. 112. – Nr. 5. – P. 556–564.