

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-24-32>

УДК 621.791.763.2

Методика определения критерия образования качественных Т-образных соединений при контактной рельефной сварке с помощью математического моделирования

Канд. техн. наук Д. Н. Юманов¹⁾, канд. техн. наук, доц. С. М. Фурманов¹⁾,
инж. А. Н. Юманова¹⁾

¹⁾Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет» (Могилев, Республика Беларусь)

Реферат. Контактная рельефная сварка различных материалов и сплавов приобрела широкое распространение в разных отраслях машиностроительной промышленности благодаря высокой производительности процесса, технико-экономическим показателям производства и обширному разнообразию типов сварных соединений. Несмотря на широкую распространенность, технологические процессы контактной рельефной сварки в производственных условиях не всегда способны обеспечить стабильно высокое качество сварных соединений. В связи с тем, что расчет параметров режима сварки проводят по универсальной методике, основанной на уравнении теплового баланса, отсутствуют рекомендательные параметры для разных типов соединений, что, как правило, приводит к завышению или занижению значений сварочного тока. Неверно определенные режимы контактной рельефной сварки приводят к появлению большого ряда дефектов Т-образных соединений. Одним из эффективных способов повышения качества сварных соединений, получаемых контактной рельефной сваркой, является математическое моделирование. Существующие математические модели процесса контактной рельефной сварки, как правило, обладают значительными приближениями в задании важных, с точки зрения цикла сварки, параметров режима, поэтому разработка модели, учитывающей их, является актуальной задачей. В статье рассматривается разработанная методика математического моделирования процесса контактной рельефной сварки Т-образных соединений с учетом фазового регулирования мощности тепловоголожения, которая используется для определения влияния энергетических параметров режима на характеристики перемещения подвижного электрода контактной сварочной машины. По результатам математического моделирования получены рекомендательные зависимости параметров режимов контактной рельефной сварки Т-образных соединений. Модель процесса контактной рельефной сварки Т-образных соединений реализована в программном продукте ANSYS. Адекватность разработанной методики математического моделирования подтверждена при помощи экспериментальных исследований процесса контактной рельефной сварки.

Ключевые слова: контактная рельефная сварка, математическое моделирование, энергетические параметры контактной сварки, перемещение электрода при контактной сварке, критерии обеспечения требуемого качества сварных соединений

Для цитирования: Юманов, Д. Н. Методика определения критерия образования качественных Т-образных соединений при контактной рельефной сварке с помощью математического моделирования / Д. Н. Юманов, С. М. Фурманов, А. Н. Юманова // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 1. С. 24–32. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-24-32>

Methodology for Determining the Criterion for the High-Quality Formation of T-Shaped Joints by Resistance Projection Welding Using Mathematical Modeling

D. N. Yumanau¹⁾, S. M. Furmanau¹⁾, H. N. Yumanava¹⁾

¹⁾Inter-State Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University”

Abstract. Resistance projection welding of various materials and alloys has become widespread in various branches of the machine-building industry due to the high productivity of the process, technological and economic parameters of manufacture

Адрес для переписки

Юманов Дмитрий Н.
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет»
пр. Мира, 43,
212000, Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 22 224-47-77
oitsp.dmitriy.y@gmail.com

Address for correspondence

Yumanau Dzmitry N.
Inter-State Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University”
43, Mira Ave.,
212000, Mogilev, Republic of Belarus
Тел.: +375 22 224-47-77
oitsp.dmitriy.y@gmail.com

of manufacture and a wide diversity of types of welded joints. Despite its widespread use, technological processes of resistance projection welding in production conditions are not always able to provide consistently high quality of welded joints. Due to the fact that the calculation of welding operation parameters is carried out according to a universal methodology based on the heat balance equation, there are no recommended parameters for different types of joints, which, as a rule, leads to an overestimation or underestimation of welding current values. Incorrectly defined parameters of projection welding lead to the appearance of a large number of defects in T-shaped joints. Mathematical modeling is one of the effective ways to improve the quality of welded joints obtained by resistance projection welding. Existing mathematical models of the projection welding process, as a rule, have significant approximations in setting important parameters of the operation from the point of view of the welding cycle, therefore, the development of a model that takes them into account is an urgent task. The paper examines the developed method of mathematical modeling of projection welding process of T-shaped joints, taking into account the phase control of the heat input power, which is used to determine the influence of energy mode parameters on displacement characteristics of movable electrode of a contact welding machine. Based on the results of mathematical modeling, recommended dependences of the parameters of resistance projection welding modes of T-shaped joints have been obtained. The model of the resistance projection welding process of T-shaped joints is implemented in the ANSYS software product. The adequacy of the developed mathematical modeling methodology has been confirmed by experimental studies of the resistance projection welding process.

Keywords: resistance projection welding, mathematical modeling, energy parameters of resistance projection welding, electrode displacement during resistance welding, criteria for ensuring the required quality of welded joints

For citation: Yumanau D. N., Furmanau S. M., Yumanava H. N. (2025) Methodology for Determining the Criterion for the High-Quality Formation of T-Shaped Joints by Resistance Projection Welding Using Mathematical Modeling. *Science and Technique*. 24 (1), 24–32. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-24-32> (in Russian)

Введение

Способы контактной рельефной сварки традиционно находят широкое применение при производстве сварных металлоконструкций, технологических узлов и изделий в различных отраслях машиностроения, сельскохозяйственной техники, автомобилестроения и авиационной промышленности. Одним из важных параметров технико-экономических показателей процесса контактной сварки является обеспечение стабильности высоких механических свойств сварных соединений, однако в производственных условиях в этом направлении существуют затруднения. Основной причиной сложности обеспечения стабильности является отсутствие конкретных рекомендаций к выбору параметров режимов сварки для широкого круга типов сварных соединений. Расчетные методики, как правило, носят общий характер, что приводит к искажению параметров режима и, как следствие, к появлению дефектов сварных соединений [1–2].

Для определения оптимальных параметров режима контактной рельефной сварки, а также предпочтительной геометрии и формы рельефов перспективными на сегодняшний день являются методы математического моделирования. В связи с широким распространением и объемами производства контактной точечной сварки большинство исследователей, занима-

ющихся вопросами моделирования, отдают приоритет именно этому способу. Проведенный анализ существующих методик моделирования рельефной сварки позволил определить, что они имеют ограниченную область применения, так как используют структуру анализа для процесса точечной сварки, в связи с похожим механизмом образования соединений. В то же время, процесс контактной рельефной сварки с точки зрения численного моделирования отличается рядом трудностей, которые связаны с возникновением интенсивных пластических деформаций, приводящих к значительным искажениям сетки конечных элементов, специфики протекания сварочного тока по областям контактирования изделий и выделения теплоты. По этой причине модели процесса контактной рельефной сварки часто реализуются в виде отдельного моделирования тепловых и электрических полей, а также процессов деформирования металла в зоне контакта деталей [3–6]. Однако наиболее полную картину о кинетике формирования сварного соединения можно получить при реализации совмещенного анализа электротермодеформационных процессов, протекающих при сварке.

Основной целью данной работы является создание полной и достоверной математической модели процесса контактной рельефной сварки с целью определения факторов, влияю-

щих на образование качественных Т-образных соединений. Для поставленных целей математического моделирования использовался программный комплекс ANSYS.

В качестве объекта исследования выбран Т-образный тип соединения, представляющий собой соединение пластины толщиной 4 мм и винта размерностью М8. Данный тип соединения представляет интерес, так как при получении его способом контактной рельефной сварки наблюдаются значительные трудности в обеспечении требуемого уровня качества. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при сварке на стандартных параметрах режима наблюдается выплеск расплавленного металла, который приводит к существенному уменьшению площади сварного соединения и соответственно снижению механических характеристик. Результаты металлографических исследований и механических испытаний Т-образных сварных соединений подтверждают, что данный тип весьма чувствителен к величине перемещения подвижного электрода сварочной машины. Поэтому предлагается использовать характеристики перемещения подвижного электрода контактной

сварочной машины в качестве критерия образования качественных Т-образных соединений. Однако определение механизма влияния и зависимости величины перемещения электрода на энергетические параметры процесса сварки является проблематичной задачей, так как процесс является кратковременным. По этой причине математическое моделирование процесса контактной рельефной сварки для этих задач является приоритетным и весомым инструментом [7–11].

Разработка математической модели процесса контактной рельефной сварки Т-образных соединений в программном продукте ANSYS

Для исследования и определения критерия образования качественного Т-образного сварного соединения разработана математическая модель процесса рельефной сварки в двумерной постановке, так как соединение представляет собой осесимметричную геометрию. Разработанная модель, приложенные нагрузки, а также начальные и граничные условия показаны на рис. 1.

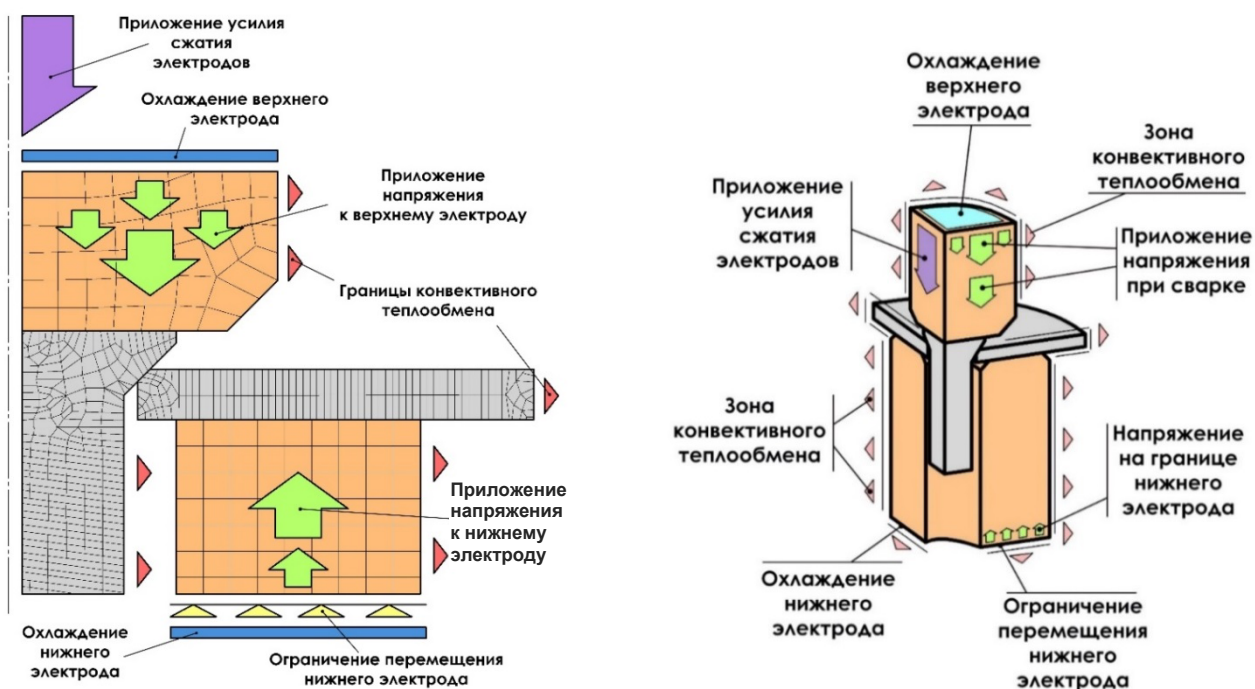


Рис. 1. Расчетная схема математической модели исследуемого процесса контактной рельефной сварки Т-образных соединений

Fig. 1. Calculation scheme of the mathematical model of the researched process of resistance projection welding of T-shaped joints

Расчетная схема состоит из таких характерных компонентов, как:

1) подвижный электрод контактной сварочной машины, к которому прикладывалось напряжение при сварке длительностью действия импульсов подогрева $I_{\text{ПОД}}$ и сварки $I_{\text{СВ}}$ по синусоидальному изменению с амплитудой $U_{\text{СВ}} = 3,5$ В и периодом изменения 0,02 с. Электроду сообщалось усилие сжатия $F_{\text{СВ}}$ в диапазоне от 1,5 до 8 кН. В качестве температурного параметра задана температура водяного охлаждения электрода $T_{\text{ОХЛ}} = 5$ °С;

2) свариваемые детали, которым заданы определенные условия контактирования по параметрам возможной тепло- и электропроводности, расчет которых проводится в зависимости от изменения температуры контакта при нагреве;

3) нижний неподвижный электрод контактной сварочной машины с условиями фиксации и ограничениями перемещения в пространстве. Как и для подвижного электрода, задан температурный параметр охлаждения $T_{\text{ОХЛ}} = 5$ °С. К поверхности электрода прикладывалось напряжение нулевого потенциала $U_0 = 0$ В.

По границам всех элементов модели заданы условия конвективного теплообмена.

Для решения задачи используется нелинейный способ в ANSYS Mechanical ADPL, реализованный по итерационному методу Ньютона – Рафсона, сущность которого заключается в разбиении основных характерных этапов задачи на подэтапы, количество которых было задано в диапазоне от 300 до 500. Характерные этапы расчета связаны с основными временными промежутками протекания процесса сварки, такими как предварительный подогрев, протекание сварочного тока $I_{\text{СВ}}$ и действие усилия сжатия $F_{\text{СВ}}$ при сварке, а также возвращение подвижного электрода в начальную позицию и остывание свариваемых деталей. В свою очередь, каждый подэтап вариативен с количеством итераций от 250 до 25000 для обеспечения высокой сходимости результатов работы совмещенных механических и термоэлектрических расчетных модулей.

На предварительном этапе расчета сварного соединения определяются условия контактного взаимодействия между элементами модели,

которые заключаются в задании параметров контактирования, зависящих от повышения температуры под действием электрического тока в контактах. Для предупреждения возможной интерференции элементов модели используется настройка контакта Frictional с учетом нагрева при возникновении сил трения.

Особенностью разработанной математической модели процесса контактной рельефной сварки является создание специализированной сетки конечных элементов, которая способна претерпевать чрезмерные пластические деформации. При их достижении расчетная программа обращается к инструменту настройки сетки с целью создания компенсационного сеточного участка в контакте для его сохранения и продолжения расчета. Для реализации совмещенного анализа процесса контактной рельефной сварки используется тип конечных элементов Plane223, содержащий расчетные алгоритмы для деформационного механического и термоэлектрического взаимодействия. Адаптация сетки проблемных сеточных участков математической модели происходит по принципу модификации конечного элемента в направлении перестроения его при достижении двух критериев: критического значения пластической деформации и критического искажения поверхностей.

Критерий критического искажения поверхности основан на значении угла деформированного участка между узлами конечного элемента. Принцип адаптивного разбиения основан на следующем условии: при превышении угла наклона между узлами более чем на 135° происходит модификация элемента первого порядка, обладающего начальной заданной размерностью, в разбиении его на конечные элементы второго порядка, обладающие меньшей размерностью. При необходимости элементы второго порядка модифицируются и разбиваются заново на элементы третьего порядка. Размерность элементов второго и третьего порядков контролируется расчетной программой автоматически.

Таким образом, предлагается модификация сетки конечных элементов, которая учитывает пластические деформации рельефа в процессе сварки и сохраняет точность расчетов.

Результаты определения критерия образования качественного Т-образного соединения при контактной рельефной сварке при помощи математического моделирования

Основным параметром, определяемым в ходе численного моделирования, являлось осевое перемещение верхнего подвижного электрода $h_{ЭЛМ}$ в разных временных диапазонах: при действии тока подогрева $I_{ПОД}$ и протекании сварочного тока $I_{СВ}$. Первый временной промежуток находится в диапазоне $\tau_{ПОД} = 0-300$ мс, где происходит предварительный разогрев металла, второй промежуток $\tau_{СВ}$ соответствует времени от 300 до 800 мс и активному плавлению под действием сварочного тока. В первом и втором временных диапазонах проходит пластическое деформирование металла сварного соединения от приложения усилия сжатия $F_{СВ}$. На рис. 2 представлены графические зависимости полученных значений перемещения электрода от времени процесса и разных значениях тока подогрева. Ступенчатый характер кривых, показанных на графических зависимостях, объясняется синусоидальным действием напряжения $U_{СВ}$. Максимальное значение перемещения подвижного электрода $h_{ЭЛМ}$ по окончании действия импульса сварочного тока составило порядка 2,4 мм (рис. 2, рис. 3).

Анализ полученных данных при моделировании показывает, что максимальное значение перемещения электрода $h_{ЭЛМ}$ достигается в момент окончания действия импульса сварочного тока $I_{СВ}$, а интенсивность и характер перемещения в большей степени определяет значение тока подогрева $I_{ПОД}$. Это позволяет сделать заключение о том, что перемещение подвижного электрода во временном диапа-

зоне $\tau_{ПОД} = 0-300$ мс оказывает существенное влияние на кинетику образования Т-образного соединения в целом. Повышение величины тока подогрева $I_{ПОД}$ приводит к изменению степени пластичности рельефа из-за роста температуры в контакте, что и интенсифицирует скорость перемещения подвижного электрода.

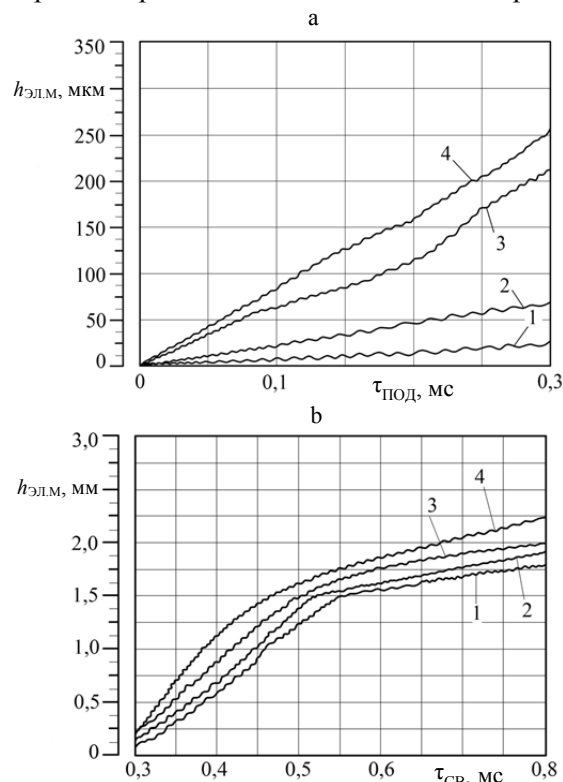


Рис. 2. Графические зависимости перемещения электрода $h_{ЭЛМ}$ во время действия тока подогрева $\tau_{ПОД}$ (а), сварочного тока $\tau_{СВ}$ (б):
 1 – $I_{ПОД} = 6$ кА; 2 – 7,5; 3 – 9; 4 – 12 кА
 Fig. 2. Graphic dependences of electrode displacement $h_{electrode, m}$ during preheat current $\tau_{preheating}$ (a), weld current $\tau_{welding}$ (b): 1 – $I_{preheating} = 6$ kA; 2 – 7,5; 3 – 9; 4 – 12 kA

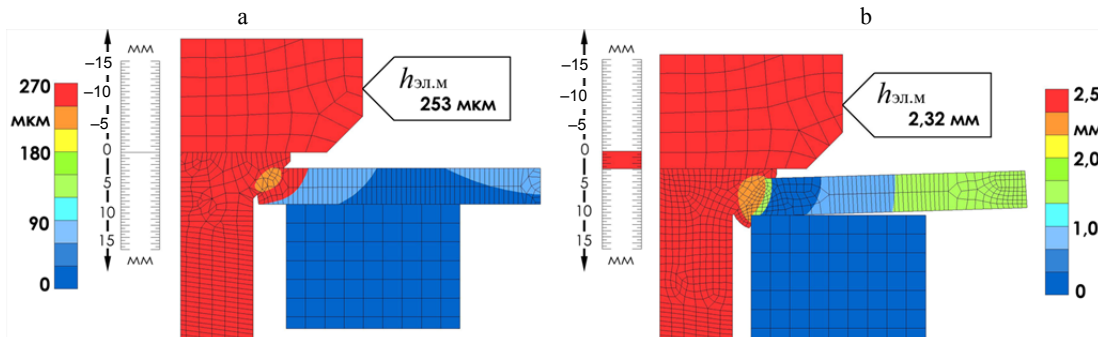


Рис. 3. Максимальное перемещение электрода по результатам численного моделирования: а – этап предварительного подогрева; б – то же протекания сварочного тока
 Fig. 3. Maximum electrode displacement according to numerical simulation results: а – preheating stage; б – welding current flow stage

В ходе моделирования определялись линии протекания сварочного тока, места их концентрации и соответственно плотность тока j при подогреве и сварке (рис. 4). В момент окончания действия импульса тока подогрева значенные плотности тока достигает 500 A/mm^2 , что свидетельствует об интенсивном нагреве области сварного соединения. При приложении импульса сварочного тока $I_{\text{СВ}}$ за короткий временной промежуток в 100 мс происходит резкое увеличение температуры. Следует отметить, что максимальная температура в контакте (свыше $1480 \text{ }^\circ\text{C}$) наблюдается не только по линии контактирования, но и по крайним точкам контакта, это говорит о том, что при разогреве до температур плавления с одновременным действием усилия сжатия $F_{\text{СВ}}$ при сварке эти области подвержены выплеску расплавленного металла. В момент окончания действия импульса сварочного тока $I_{\text{СВ}}$ плотность тока j в соединении уменьшается в связи с увеличением площади контакта. На рис. 4а представлена картина распределения плотности тока при окончании действия импульса подогрева, на рис. 4б – окончания действия импульса тока сварки.

На основании картин распределения плотности тока в сварном соединении построены области распределения температур (рис. 5) на этапе предварительного подогрева свариваемых деталей и при действии сварочного импульса. Максимальная температура в области концентрации линий протекания сварочного

тока превышает $1480 \text{ }^\circ\text{C}$, где происходит активный разогрев металла. Электродный узел в процессе сварки не нагревается свыше температур $120\text{--}180 \text{ }^\circ\text{C}$, что связано с заданными условиями водяного охлаждения и конвективного теплообмена.

Для оценки валидации результатов математического моделирования проводились экспериментальные исследования процесса получения Т-образных соединений при помощи контактной рельефной сварки. Способ оценки адекватности моделирования основан на сравнении значений перемещения верхнего электрода $h_{\text{ЭЛ}}$ в процессе сварки и значений перемещения $h_{\text{ЭЛ,м}}$, полученных при расчетах. Регистрация величины перемещения подвижного электрода при проведении экспериментальных исследований $h_{\text{ЭЛ}}$ осуществлялась с использованием оптоэлектронного преобразователя линейных перемещений ЛИР-17. Данные регистрировались во временном интервале от 0 до 550 мс с целью захвата величины перемещения при действии импульса тока подогрева $I_{\text{ПОД}}$ и импульса тока при сварке $I_{\text{СВ}}$, а также в зависимости от различных величин тока подогрева $I_{\text{ПОД}}$. На рис. 6 представлены графические интерпретации полученных результатов валидации. Сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных исследований показало расхождение в 2,56 %, что в полной мере свидетельствует о достаточной адекватности результатов математического моделирования.

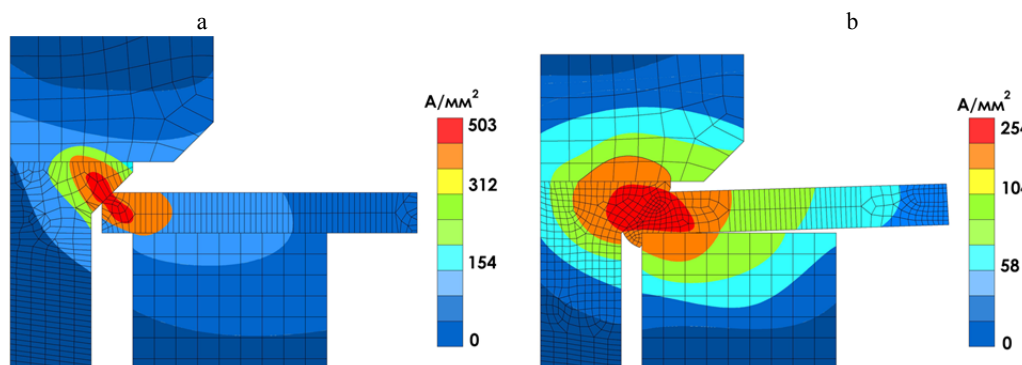


Рис. 4. Плотность сварочного тока по результатам численного моделирования:
а – на этапе предварительного подогрева; б – окончания протекания сварочного тока

Fig. 4. Welding current density according to numerical simulation results:
a – at preheating stage; b – at the end of welding current flow

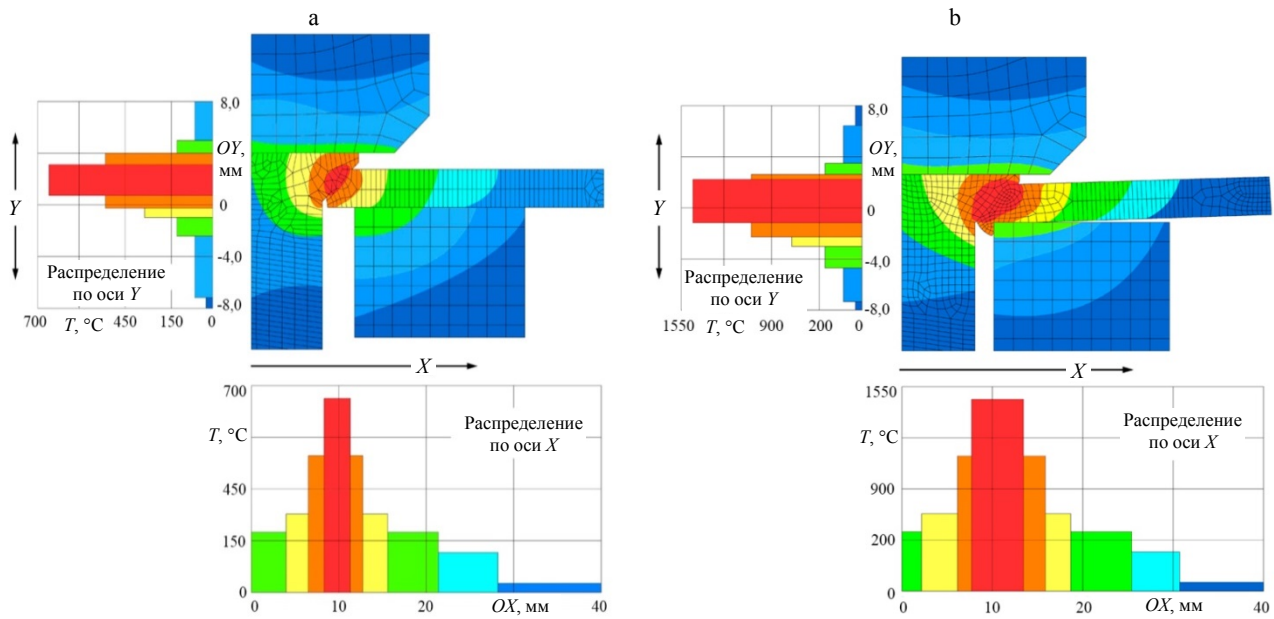


Рис. 5. Распределение температур в соединении по результатам моделирования:
 а – на этапе предварительного подогрева; б – протекания сварочного тока

Fig. 5. Temperature distribution in the joint by simulation results: a – preheating stage; b – welding current flow stage

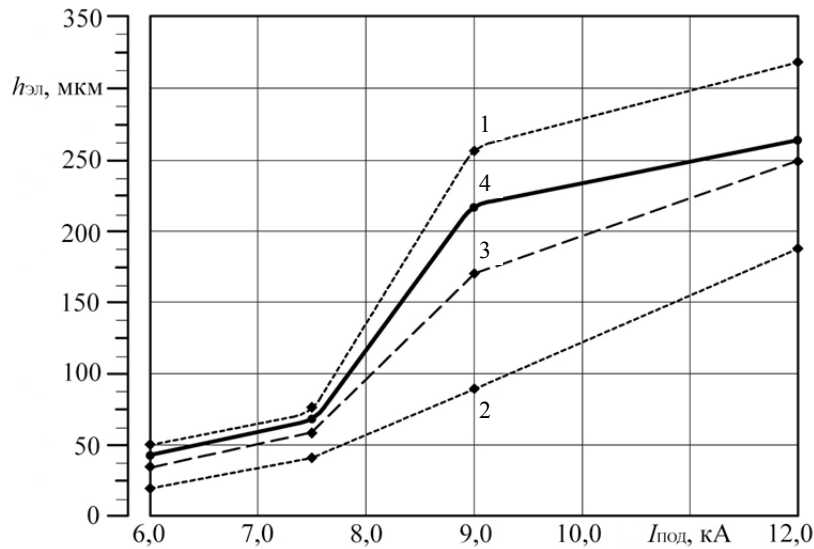


Рис. 6. Сравнение результатов экспериментальных исследований с результатами моделирования по перемещению верхнего электрода в зависимости от величины тока подогрева:
 1 – максимальные значения перемещения при экспериментальных исследованиях;
 2 – минимальные значения перемещения при экспериментальных исследованиях;
 3 – средние значения перемещения при экспериментальных исследованиях;
 4 – значения перемещения, полученные в ходе численного моделирования

Fig. 6. Comparison of experimental results with simulation results by moving the top electrode depending on the heating current value:
 1 – maximum displacement values in experimental studies;
 2 – minimum displacement values in experimental studies;
 3 – average displacement values in experimental studies;
 4 – displacement values obtained during numerical simulation

Результатом описанного выше исследования является определение рекомендательного диапазона, область которого отображает влияние характеристик перемещения подвижного электрода на требуемое качество Т-образных сварных соединений, что может использоваться как критерий образования качественных соединений (рис. 7). Для рассматриваемой геометрии Т-образного сварного соединения предлагается использовать наиболее оптимальное значение тока подогрева $I_{\text{ПОД}} = 9$ кА, при котором вероятность появления выплеска резко снижается, что замечено при проведении экспериментальных исследований. Среднее значение усилия на отрыв при механических испытаниях сварных соединений составляет $F_{\text{СВ}} = 25,2$ кН (разброс значений от 20,16 до 31,5 кН), при необходимом значении минимальной разрушающей нагрузки 19,5 кН. При этом перемещение подвижного электрода $h_{\text{ЭЛ}}$ при подогреве находится в диапазоне 80–260 мкм, что и является рекомендуемым интервалом для обеспечения требуемого качества сварных соединений. В случае выхода за предел рекомендуемого интервала наблюдается выплеск расплавленного металла в связи с перегревом сварного соединения, при недостаточном нагреве – снижение прочности и дефекты в виде несплавления.

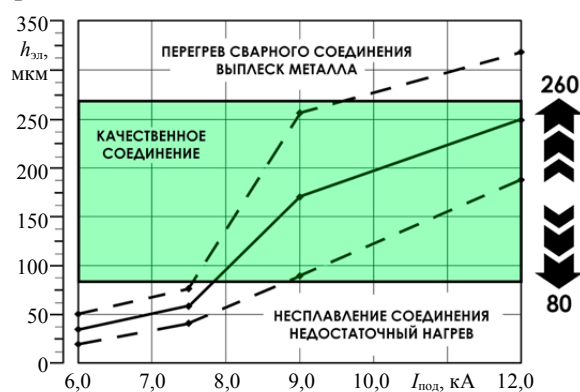


Рис. 7. Рекомендательная графическая зависимость величины тока подогрева от характеристик перемещения подвижного электрода

Fig. 7. Recommended graphical dependence of heating current value on the displacement characteristics of movable electrode

Проведенные исследования в настоящее время находят применение в виде интеграции полученных результатов математического моделирования с управляющим оборудованием для контактной рельефной сварки. Реализация рекомендательных зависимостей и критерия обеспечения требуемого качества сварных со-

единений в программном коде управляющей аппаратуры позволит расширить возможности задания параметров режима, а также своевременно отслеживать кинетику формирования соединения.

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных исследований предлагается методика определения критерия образования качественных сварных Т-образных соединений при помощи математического моделирования процесса контактной рельефной сварки по характеристикам перемещения подвижного электрода $h_{\text{ЭЛ.М}}$. Предлагаемая методика экспериментально апробирована, подтверждена адекватность полученных результатов, что в совокупности позволяет с высокой степенью точности определять и корректировать параметры режима контактной рельефной сварки Т-образных соединений.

2. В результате математического моделирования установлено, что перемещение верхнего подвижного электрода $h_{\text{ЭЛ.М}}$ при временном промежутке, соответствующем действию импульса тока подогрева $I_{\text{ПОД}}$, оказывает определяющее воздействие на кинетику образования качественного соединения в связи с существенным ростом температуры в контакте свариваемых деталей.

3. Предложена рекомендательная графическая зависимость влияния тока подогрева $I_{\text{ПОД}}$ на величину перемещения подвижного электрода $h_{\text{ЭЛ}}$, которая может использоваться для определения степени разогрева и интенсивности роста температуры в контакте свариваемых деталей. По результатам математического моделирования и экспериментальных исследований определен диапазон образования качественного Т-образного соединения, в котором отсутствует выплеск металла и величина перемещения подвижного электрода составляет $h_{\text{ЭЛ}} = 80\text{--}260$ мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. О фазовом регулировании мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной рельефной сварке / С. М. Фурманов [и др.] // Вестник Белорус.-Рос. ун-та. 2018. № 1. С. 80–91.
2. Экспериментальное определение энергетических параметров процесса контактной рельефной сварки / А. Ю. Поляков [и др.] // Вестник Белорус.-Рос. ун-та. 2017. № 1. С. 74–83.
3. Юманов, Д. Н. О моделировании термоэлектрических процессов при контактной рельефной сварке / Д. Н. Юманов, С. М. Фурманов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы

- Международ. науч.-техн. конф. / редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2018. С. 189.
4. Юманов, Д. Н. Моделирование процесса контактной рельефной сварки с программным управлением мощностью тепловложения // Юманов Д. Н., Королев Е. М. // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международ. науч.-техн. конф. / редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]*. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2022. С. 198.
 5. Numerical Analysis of Projection Welding on Auto-Body sheet Metal Using a Coupled Finite Element Method / W.-F. Zhu, Z.-Q. Lin, X.-M. Lai, A.-H. Luo // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. Vol. 28, No 1–2. P. 45–52. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2336-8>.
 6. Numerical Simulation of Resistance Spot Welding of Al to Zinc-Coated Steel with Improved Representation of Contact Interactions / Z. Wan, H.-P. Wang, M. Wang [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 101. P. 749–763. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.023>.
 7. Юманов, Д. Н. О расчете мощности при контактной рельефной сварке с помощью математического моделирования ANSYS / Д. Н. Юманов // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международ. науч.-техн. конф. молодых ученых / редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]*. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2023. С. 98.
 8. О влиянии параметров режима контактной рельефной сварки с программным управлением мощностью тепловложения на стабильность прочностных показателей соединений / Д. Н. Юманов, С. М. Фурманов, И. Н. Смоляр [и др.] // *Вестник Беларус.-Рос. ун-та*. 2020. № 3. С. 80–91.
 9. Юманов, Д. Н. О перемещении подвижного электрода при контактной рельефной сварке как критерии образования качественного соединения / Д. Н. Юманов, И. А. Наумовец, Л. С. Малашенко // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международ. науч.-техн. конф. / редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]*. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. С. 105.
 10. О влиянии энергии тепловложения на ширину линии сплавления Т-образных соединений при рельефной сварке с программным управлением / С. М. Фурманов Д. И. Якубович, Д. Н. Юманов [и др.] // *Вестник Беларус.-Рос. ун-та*. 2021. № 4. С. 88–95.
 11. О влиянии тока подогрева на прочность соединений при контактной рельефной сварке // С. М. Фурманов [и др.] // *Вестник Беларус.-Рос. ун-та*. 2022. № 3. С. 87–95.
 3. Yumanau D. N., Furmanov S. M. (2018) On Modeling Thermoelectric. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Processes during Resistance Relief Welding. Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 189 (in Russian).
 4. Yumanau D. N., Korolev E. M. (2022) Simulation of the Process of Contact Relief Welding with Software Control of Heat Input Power. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 198 (in Russian).
 5. Zhu W.-F., Lin Z.-Q., Lai X.-M., Luo A.-H. (2006) Numerical Analysis of Projection Welding on Auto-Body Sheet Metal Using a Coupled Finite Element Method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28 (1–2), 45–52. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2336-8>.
 6. Wan Z., Wang H.-P., Wang M., Carlson B. E., Sigler D. R. (2016) Numerical Simulation of Resistance Spot Welding of Al to Zinc-Coated Steel with Improved Representation of Contact Interactions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 749–763. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.023>.
 7. Yumanau D. N. (2023) On Calculating Power in Resistance Projection Welding Using ANSYS Mathematical Modeling. *Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. molodykh uchenykh* [New Materials, Equipment and Technologies in Industry: Proceedings of International Scientific and Technical Conference of Young Scientists]. Mogilev, Belarusian-Russian University. 98 (in Russian).
 8. Yumanov D. N., Furmanov S. M., Smolar I. N., Kamchitskaya I. D., Koroteyev A. O. (2020) On the Influence of the Parameters of the Resistance Relief Welding Mode with Programmable Control of the Heat Input Power on the Stability of the Strength Parameters of the Joints. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (3), 80–91 (in Russian).
 9. Yumanau D. N., Naumovets I. A., Malashenko L. S. On the Movement of the Movable Electrode during Resistance Relief Welding as a Criterion for the Formation of a High-Quality Joint. *Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [New Materials, Equipment and Technologies in Industry: Proceedings of Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 105 (in Russian).
 10. Furmanov S. M., Yakubovich D. I., Yumanov D. N., Malashenko L. S., Naymovets I. A. (2021) On the Influence of Heat Input Energy on the Width of the Fusion Line of T-Shaped Joints during Projection Welding with Program Control. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (4), 88–95 (in Russian).
 11. Furmanov S. M., Yumanov D. N., Yakubovich D. I., Emel'yanov S. N., Korolev E. M. (2022) On the Influence of Heating Current on the Strength of Joints during Resistance Relief Welding. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (3), 87–95 (in Russian).

Поступила 27.09.2024

Подписана в печать 28.11.2024

Опубликована онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Furmanov S. M., Polyakov A. Yu., Yumanov D. N., Kukharev A. N. (2018) On Phase Control of Heat Input in the Interelectrode Space During Resistance Welding. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], (1), 80–91 (in Russian).
2. Polyakov A. Yu., Furmanov S. M., Fedotov B. V., Yumanov D. N., Kolobova M. S. (2017) Experimental Determination of Energy Parameters of the Resistance Relief Welding Process. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (1), 74–83 (in Russian).

Received: 27.09.2024

Accepted: 28.11.2024

Published online: 31.01.2025