

УДК 621.791.763.2

В. П. Березиенко, Т. И. Бендик

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ

UDC 621.791.763.2

V. P. Berezienko, T. I. Bendik

DETERMINATION OF THE PROJECTION WELDING PROCESS PARAMETERS ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODELLING

Аннотация

Разработана математическая модель термодформационного процесса контактной Т-образной рельефной сварки, с помощью которой проведена оценка влияния основных параметров режима сварки и геометрических характеристик применяемых рельефов на формирование сварных соединений.

Предложены рекомендации по выбору основных параметров режима Т-образной рельефной сварки низкоуглеродистых сталей: размеров рельефа, величины сварочного тока и времени его протекания.

Ключевые слова:

метод конечных элементов, рельефная сварка, параметры режима, размеры рельефа, направленная пластическая деформация.

Abstract

The mathematical model of the thermal deformation process of T-shaped resistance projection welding has been developed, by means of which it has been determined how basic welding parameters and geometrical characteristics of used projections influence the welded joints formation process.

The recommendations for choosing the key parameters of T-shaped projection welding of low-carbon steels are presented, such as projection sizes, welding current magnitude and time of its flow.

Key words:

finite element method, projection welding, welding parameters, projection size, directed plastic deformation.

Основные трудности с широким применением в промышленности такого высокопроизводительного способа, как контактная рельефная сварка, связаны с большим разнообразием конструктивных форм свариваемых деталей и отсутствием обобщенных рекомендаций по выбору основных параметров режима сварки и геометрических характеристик применяемых рельефов.

Изменяя форму и размеры рельефа, можно воздействовать на характер нагрева и деформирования металла в зоне сварки, а следовательно, и на геометрические и прочностные показатели

соединений.

Характерной особенностью рельефной сварки Т-образных соединений бобышек с листовой деталью (рис. 1) является отсутствие зоны взаимного расплавления.

Для получения надежных соединений при сварке в твердой фазе необходима совместная пластическая деформация металла свариваемых деталей, приводящая к разрушению оксидных пленок, активации контактных поверхностей, образованию между ними физического контакта и объемного взаимодействия [1, 2]. Если условия

процесса исключают возможность пластической деформации металла в нужном объеме, то прочность соединений в твердой фазе оказывается низкой и нестабильной.

Анализ производственной практики применения контактной рельефной

сварки показывает, что большинство дефектов сварных соединений вызваны нерациональным выбором параметров режима сварки, а также отсутствием нормативной базы, регламентирующей требования к форме и размерам применяемых рельефов (табл. 1).

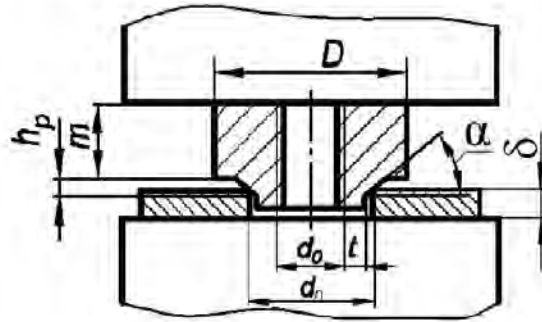
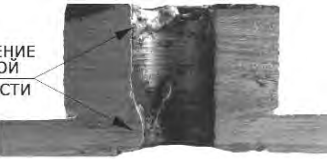


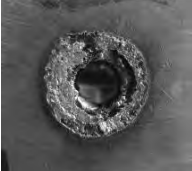
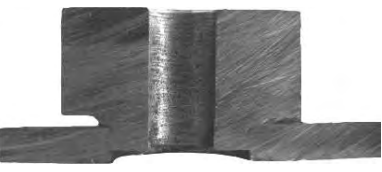




Рис. 1. Схема процесса рельефной сварки «острой гранью»: D – диаметр бобышки; h_p – высота рельефа; α – угол рельефа; δ – толщина листа; m – высота бобышки; d_0 – диаметр внутренней резьбы; d_n – диаметр отверстия в листовой детали; t – толщина стенки

Табл. 1. Нарушение точности геометрических параметров при возникновении дефектов в Т-образных сварных соединениях

Вид дефекта и причина его возникновения	Макрошлифы Т-образных сварных соединений	
Выплески на лицевых и резьбовых поверхностях изделия из-за нерационального выбора параметров режима сварки и формы рельефа		
Повреждение лицевых поверхностей изделия из-за грубой механической обработки и нерациональной формы рельефа		
Непровар из-за отклонения от параллельности поверхностей свариваемых деталей		
Непровар из-за нерационального выбора параметров режима сварки		

Целью данного исследования является теоретическое обоснование параметров режима контактной рельефной сварки Т-образных соединений бобышек с листом, основанное на изучении кинетики формирования сварного соединения при помощи математической модели процесса.

Математическое моделирование – перспективное направление в оптимизации формы и размеров рельефов, параметров режима для такого быстропротекающего процесса, как контактная рельефная сварка. Проведенные в данной области исследования пока не позволили полностью решить проблемы, связанные с необходимостью анализа совмещенной электротермодеформационной задачи с учетом быстропротекающих пластических деформаций, которым подвергается зона сварного соединения в процессе осадки рельефа Т-образных соединений [3, 4].

Для теоретического обоснования параметров режима сварки, формы и геометрических характеристик рельефов разработана математическая модель термоупругопластического деформирования металла зоны соединения при сварке, учитывающая особенности нагрева при прохождении электрического тока, характер неизотермического упругопластического деформирования, зависимости теплофизических и механических свойств материалов от температуры, скрытую теплоту плавления.

Модель отличается использованием конечно-элементного пошагово-совмещенного анализа электрических, температурных и деформационных полей с учетом изменения электрических и тепловых сопротивлений контактов, а также возможностью обеспечения сходимости вычислительного процесса при значительных пластических деформациях металла рельефа [5–7]. Результаты проведенного математического моделирования, а также ряда металлографиче-

ских исследований показали, что процесс образования сварного соединения при сварке Т-образных соединений можно охарактеризовать следующими четырьмя этапами:

1) совместной деформации рельефа и листовой детали до включения сварочного тока;

2) интенсивной высокоскоростной деформации листовой детали в начальный период протекания сварочного тока;

3) дальнейшей низкоскоростной деформации листовой детали в процессе протекания сварочного тока;

4) охлаждения металла зоны сварки и окончательного формирования сварного соединения под действием усилия сжатия электродов.

Первый этап формирования сварного соединения в твердой фазе начинается с предварительного сжатия деталей и создания между ними механического контакта. В качестве параметра, описывающего контактное взаимодействие бобышки и листа, использовался размер контактной площадки l_k (рис. 2). Как показали проведенные вычислительные эксперименты, размер контактной площадки l_k в момент включения сварочного тока составляет 0,3...1,2 мм в зависимости от угла рельефа α и усилия сжатия электродов.

Наличие контакта между бобышкой и листом в момент включения сварочного тока обеспечивает высокое начальное контактное электрическое сопротивление и высокую плотность тока, что приводит к интенсивному нарастанию температуры в зоне контакта деталь–деталь (до 10^4 К/С). Предварительная деформация рельефа способствует стабилизации электрического сопротивления сварочного контакта в зоне деталь–деталь в момент включения сварочного тока и является необходимым условием получения качественных сварных соединений.

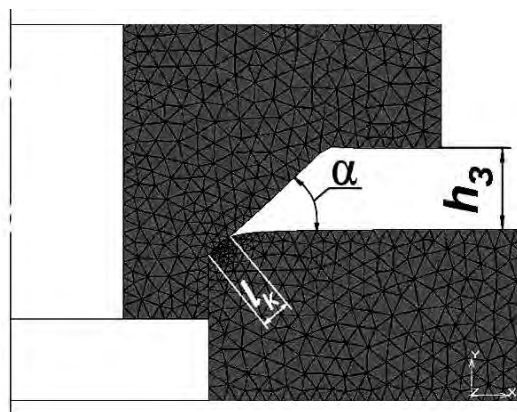


Рис. 2. Образование начального контакта свариваемых деталей

Второй этап образования сварного соединения начинается с момента включения сварочного тока. В процессе сварки активация контактных поверхностей происходит посредством нагрева (термическая активация) и пластической деформации (механическая активация) под действием усилия сжатия электродов.

При прохождении первых импульсов сварочного тока металл зоны сварного соединения нагревается до температуры разупрочнения $T > 800$ К, что сопровождается ростом контактной площадки l_k . Интенсивная пластическая деформация металла кромки листовой детали и рельефа обеспечивает разрушение и удаление оксидных пленок из зоны сварки, ускоряет активацию контактных поверхностей.

Отличительной особенностью процесса рельефной сварки Т-образных соединений является преимущественная деформация кромки листовой детали, металл рельефа бобышки практически не претерпевает значительных деформаций в радиальном направлении. Это позволяет успешно реализовывать данный способ сварки для изделий с внутренней или наружной резьбой.

Стабильность процесса сварки на данном этапе зависит от соблюдения следующих условий:

- наличие плавного увеличения

сварочного тока, компенсирующего малую площадь контакта деталь–деталь в момент включения сварочного тока;

- нарастание величины сварочного тока должно соответствовать изменению размера контактной площадки l_k при деформации рельефа.

На третьем этапе формирования сварного соединения значительно снижается скорость перемещения подвижного электрода, что объясняется интенсивным ростом размера контактной площадки l_k и некоторым снижением плотности тока. При нормальном ходе процесса сварки на этом этапе наблюдается процесс разогрева и значительной пластической деформации металла листовой детали и бобышки. В процессе протекания сварочного тока размеры зоны сварки, а значит, и прочность сварного соединения растут, и к моменту выключения сварочного тока металл разогревается до температур порядка 1450 К.

В литературных источниках [8–11] приводятся различные значения угла рельефа ($\alpha = 30, 45$ и 60°), однако обобщенных рекомендаций по выбору данного параметра нет. Проведенный на основе математической модели анализ кинетики образования сварного соединения показал, что величина угла рельефа α оказывает существенное влияние на температурное поле и изменение

размера контакта деталь–деталь в процессе сварки.

При углах рельефа менее 30° значительно снижается интенсивность тепловыделения в зоне контакта деталь–деталь и для достижения температуры образования сварного соединения в твердой фазе ($T > 1450 \text{ K}$), а также полной осадки рельефа на всю его высоту требуется увеличивать величину сварочного тока либо длительность его протекания.

При углах рельефа более 60° достижение высоких температур в зоне сварного соединения происходит при малых значениях контактной площадки. Это приводит к росту вероятности появления выплеска, что резко снижает прочностные показатели и параметры точности сварного соединения.

Установлено, что при Т-образной сварке с целью предотвращения возникновения деформаций внутренней стенки бобышки (резьбовое отверстие не должно повреждаться после выполнения сварочной операции) угол рельефа следует выбирать в пределах $40 \dots 45^\circ$.

Для обеспечения требуемых параметров точности сварного соединения толщина стенки бобышки должна быть не менее $t \geq 0,8 + 0,2d_0$, а высота рельефа находится в следующей функциональной зависимости от диаметра резьбы $h_p = 0,17 \cdot d_0^{0,95}$.

Четвертый этап образования сварного соединения начинается с момента выключения сварочного тока. Согласно [11] на данном этапе развивается объемное взаимодействие в зоне сварки. Оно начинается в активных центрах (дислокациях, вакансиях и других дефектах структуры) и протекает путем роста и слияния очагов взаимодействия по всей контактной поверхности. Затем происходит релаксация напряжений, образование промежуточных фаз, рекристаллизация и т. д.

Проведенные исследования структур сварных соединений при сварке «острой гранью» подтверждают, что

формирование сварного соединения происходит без наличия расплавленной зоны. Характерно, что при сварке в твердой фазе более благоприятными являются такие условия протекания процесса, при которых достигается максимальная степень пластического деформирования металла зоны сварного соединения. Как показал проведенный анализ кинетики процесса сварки, такие условия могут быть обеспечены выбором формы и размеров рельефа, а также сочетанием соответствующих параметров режима сварки [7].

Анализ осциллограмм скорости перемещения электрода при сварке образцов показал, что наблюдается заметное снижение скорости перемещения электрода, обусловленное сложными условиями деформирования металла рельефа и его вытеснением в радиальном направлении. Для интенсификации процесса пластического деформирования металла предложена новая форма рельефа (пат. ВУ 5654 U *Рельеф для Т-образной рельефной сварки*), при которой:

- обеспечивается стабильность прочностных показателей из-за увеличения фактической площади сварки путем создания направленной пластической деформации металла;

- обеспечивается точность изделия (путем уменьшения зазора между бобышкой и листом, т. к. пластифицированный металл рельефа заполняет пространство предварительно сформированной канавкой тороидальной формы радиусом R (рис. 3, а));

- плоская площадка среза длиной $l = R$ (см. рис. 3, а) обеспечивает точную центровку верхней детали в отверстии пластины и гарантирует наличие первоначального контакта деталь–деталь, стабилизируя контактное сопротивление в зоне сварки;

- наличие фаски размером $b \times 45^\circ$ позволяет исключить повреждение резьбового отверстия при контакте торцевой поверхности свариваемых деталей с электродом.

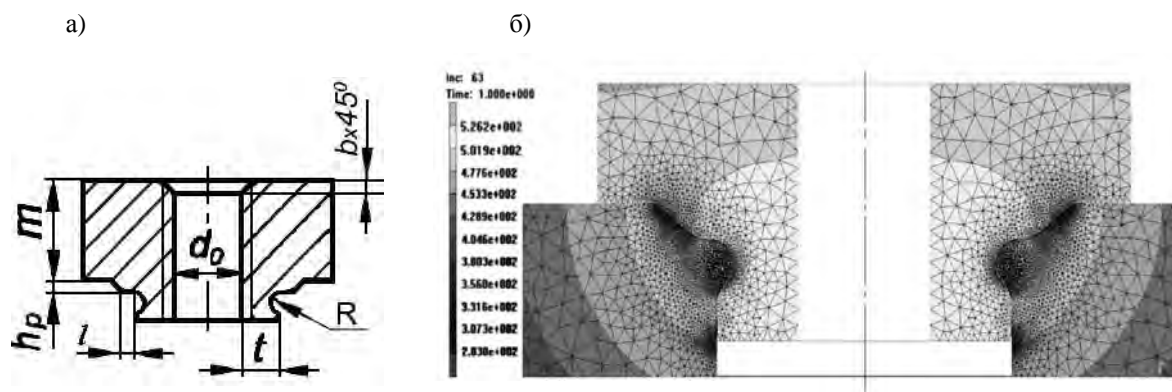


Рис. 3. Рельеф для сварки «острой гранью»: а – конструктивные размеры; б – характер пластического деформирования металла зоны сварного соединения (данные математического моделирования)

Данная форма рельефа обеспечивает направленную пластическую деформацию металла, требуемую точность геометрических характеристик при сохранении высоких и стабильных прочностных показателей сварных соединений из-за увеличения площади сварки и уменьшения зазора между деталями. При использовании предлагаемой формы рельефа часть пластифицированного металла заполняет полость предварительно сформированной выточки, процесс осадки рельефа происходит без значительных колебаний скорости перемещения электрода (см. рис. 3, б).

Для обеспечения качественного процесса сварки необходимо осуществлять модуляцию сварочного тока, что позволяет существенно снизить вероятность возникновения начальных выплесков. Выбор величины сварочного тока осуществлялся исходя из расчетного значения площади сварки и допустимой плотности тока.

Установлено, что для определения величины сварочного тока в зависимости от диаметра отверстия бобышки следует использовать эмпирическую формулу (рис. 4)

$$I_{CB} = 650 \cdot d_0^{1,45} \cdot \delta^{0,18}, \quad (1)$$

где d_0 – диаметр резьбового отверстия бобышки, мм; δ – толщина листа, мм; $\delta^{0,18}$ – коэффициент для учета толщины листа.

Длительность протекания сварочного тока следует выбирать прямо пропорционально диаметру резьбового отверстия бобышки исходя из зависимости

$$\tau_{CB} = (0,06 + 0,03d_0) \cdot \delta^{0,18}. \quad (2)$$

При реализации технологического процесса сварки использовалась схема с прямым токоподводом к торцу бобышки и циклограмма с постоянным усилием сжатия электродов и модуляцией сварочного тока. На основе проведенных экспериментальных исследований выдвинуты следующие требования к подготовке деталей под сварку:

- поверхности деталей, контактирующие с электродами, должны иметь шероховатость не более $R_z = 40$;
- отклонения угла рельефа от номинальных значений не должны превышать $\pm 1^\circ$;
- несоосность отверстий бобышки и листа не должна превышать 0,1 мм;
- детали не должны иметь заусенцев на поверхностях контактирования с электродами, на поверхности рельефа и на поверхности внешнего отверстия в зоне контакта с пластиной.

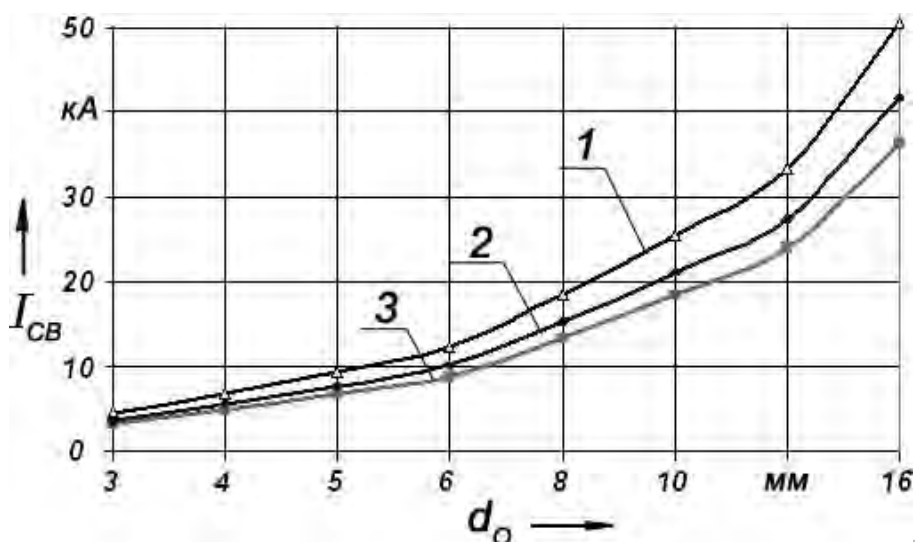


Рис. 4. Зависимость величины сварочного тока от диаметра резьбы бобышки при сварке «острой гранью»: 1 – толщина пластины $\delta = 3$ мм; 2 – $\delta = 2$ мм; 3 – $\delta = 1$ мм

Анализ гистограмм усилия на отрыв сварных соединений с предложенной формой рельефа показал, что размах прочности снизился в 1,5 раза по сравнению с образцами, сваренными при помощи традиционной формы рельефа, а среднее значение прочности соединений увеличилось на 18...20 %.

Выводы

1. С целью теоретического изучения процесса Т-образной рельефной сварки разработана математическая модель, которая осуществляет совместный температурный, электрический и деформационный расчет, позволяет задавать граничные условия в контактах электрод–деталь и деталь–деталь, учитывает нелинейность электротеплофизических свойств материала деталей и электродов, изменение плотности тока и размеры контактной поверхности, а также отличается возможностью обеспечения сходимости вычислительного процесса при значительных пластических деформациях металла рельефа.

2. На основании разработанной математической модели и проведенных металлографических исследований изучена кинетика образования сварного соединения при рельефной сварке Т-образных соединений бобышек с листом. Показано, что отличительной особенностью данного процесса сварки является преимущественная деформация кромки листовой детали, при этом металл рельефа бобышки практически не претерпевает значительных деформаций. В то же время величина угла рельефа оказывает существенное влияние на температурное поле и изменение размера контакта деталь–деталь в процессе сварки.

3. Предложена новая форма рельефа, обеспечивающая направленную пластическую деформацию металла зоны сварного соединения, даны рекомендации по выбору геометрических параметров рельефа, величины сварочного тока, а также длительности его протекания в зависимости от размеров свариваемых деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гилевич, В. А.** Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Л. : Машиностроение, 1976. – 152 с. : ил.
2. **Кочергин, К. А.** Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение, 1987. – 240 с.
3. **Sun, X.** Modeling of projection welding processes using coupled finite element analyses / X. Sun // Welding Journal. – 2000. – № 79. – С. 244–251.
4. **Sun, X.** Effect of projection height of projection collapse and nugget formation-a finite element study / X. Sun // Welding Journal. – 2000. – № 80. – С. 211–216.
5. **Березиенко, В. П.** Перспективы использования математического моделирования для выбора технологических параметров процесса Т-образной рельефной сварки / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование : материалы VI Междунар. науч.-техн. семинара, Санкт-Петербург, 23–25 окт. 2007 г. / Институт сварки России. – СПб. : ВиТ-Принт, 2008. – С. 54–59.
6. **Березиенко, В. П.** Совершенствование технологии контактной точечной и рельефной сварки / В. П. Березиенко, В. А. Попковский, С. Ф. Мельников. – Минск : Выш. шк., 1990. – 120 с.
7. О кинетике образования сварного соединения при Т-образной рельефной сварке «острой гранью» / В. П. Березиенко [и др.] // Сварка и родственные технологии : Респ. межведомственный сб. науч. тр., Минск, 2008. – № 10. – С. 85–90.
8. Оборудование для контактной сварки : справ. пособие / Под ред. В. В. Смирнова. – СПб. : Энергоатомиздат, 2000. – 848 с.
9. **Липа, М.** Контактная рельефная сварка / М. Липа, Я. Голасек. – Киев : Техника, 1971. – 324 с. : ил.
10. Технология и оборудование контактной сварки: учебник для машиностроительных вузов / Под общ. ред. Б. Д. Орлова. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
11. Особенности образования соединения при контактной рельефной сварке «острой гранью» / Э. С. Каракозов [и др.] // Сварочное производство. – 1985. – № 1. – С. 10–12.

Статья сдана в редакцию 1 октября 2012 года

Валерий Петрович Березиенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-295-44-11-75.

Татьяна Ивановна Бендик, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-42-76-56.

Valery Petrovich Berezienko, DSc (Engineering), Belarusian-Russian University. Tel.: +375-295-44-11-75.

Tatiana Ivanovna Bendik, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. Tel.: +375-293-42-76-56.