



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДУГОВОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О. В. МАХНЕНКО, д-р техн. наук, **А. Н. ТИМОШЕНКО**, канд. техн. наук,
А. Ф. МУЖИЧЕНКО, **П. В. ГОНЧАРОВ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Для оценки возможности совершенствования технологии дуговой точечной сварки плавящимся электродом проведено математическое моделирование процесса сварки с применением метода термопластичности в сочетании с методом конечных элементов. На основе данных о размерах зоны сплавления и уровне остаточных напряжений в зоне сварной точки выполнена оценка работоспособности точечного сварного соединения при статических и переменных нагрузках.

Ключевые слова: дуговая точечная сварка, нахлесточные соединения, сварные корпусные конструкции, прочность, математическое моделирование

Технология дуговой точечной сварки (ДТС) нахлесточных соединений известна достаточно хорошо и давно применяется для получения угловых и стыковых соединений [1–3]. Одним из недостатков этой технологии при соединении элементов толщиной более 1,5 мм является невозможность обеспечения качества формирования сварного соединения в вертикальном положении и соответственно его работоспособности под действием эксплуатационных нагрузок. В этом случае получение соединений удовлетворительного качества достигается лишь при ДТС по отверстиям, предварительно пробитым в наружных элементах, что значительно увеличивает трудоемкость работ. При отсутствии отверстий для проплавления нижнего элемента нахлесточного соединения необходимо существенно повышать сварочный ток, что приводит к увеличению объема расплавленного металла и стеканию его по вертикальной плоскости, при этом нарушается качественное формирование сварной точки (рис. 1).

В работе [4] предложена усовершенствованная технология ДТС плавящимся электродом в защитных газах нахлесточных соединений в вертикальном положении без предварительной пробивки отверстий в наружном привариваемом листе, которая обеспечивает получение сварных точечных соединений заданных размеров и высокого качества за счет программирования многоциклового сварочного нагрева. Сварочные циклы обеспечивают подогрев, проплавление (прожог) наружного листа и последующее формирование сварной точки. Современный уровень автоматики позволяет запрограммировать режимы последовательности сварочных циклов и осуществлять сварку в ав-

томатическом или полуавтоматическом режиме. Однако выбор режимов многоциклового сварочного нагрева для каждого сочетания материала и толщины соединяемых элементов экспериментальным путем — достаточно трудоемкий процесс.

В настоящей работе рассмотрены возможности применения математического моделирования с целью совершенствования технологии ДТС. Моделирование процесса сварки выполнено с применением методов термопластичности в сочетании с методом конечных элементов. На основании данных о размерах зоны сплавления и уровне остаточных напряжений в области сварной точки оценена работоспособность точечного сварного соединения при статических и переменных нагрузках.



Рис. 1. Некачественно сформированная сварная точка вследствие стекания расплавленного металла по вертикальной плоскости

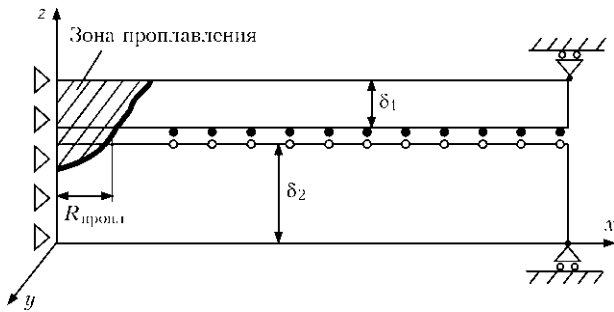


Рис. 2. Схема конечно-элементной модели точечного дугового сварного соединения, полученного ДТС: белые и черные точки — контактные элементы поверхности соответственно верхнего и нижнего соединяемых листов; δ_1, δ_2 — толщина соответственно верхнего и нижнего соединяемых листов

Для проведения моделирования ДТС внахлест разработана конечно-элементная модель (рис. 2). Использована модель пространственно-распределенного источника сварочного нагрева в осесимметричной двухмерной постановке, для которой удельный тепловой поток имеет следующее распределение:

$$q(x, y) = \frac{2q_{эф}}{\pi} k_x \sqrt{k_y} \exp(-k_x x^2 - k_y (y - y_0)^2),$$

где $q_{эф} = \eta I_{св} U_d$ — эффективная тепловая мощность сварочного источника нагрева; $I_{св}$ — сварочный ток; U_d — напряжение на дуге; η — коэффициент полезного действия сварочного нагрева; k_x, k_y — коэффициенты распределения тепловой мощности.

Тепловое контактное сопротивление (ТКС) между двумя свариваемыми пластинами зависит от чистоты и шероховатости поверхности, контактного давления и зазора между пластинами. Поэтому в каждом конкретном случае при сварке пластин значение коэффициента ТКС может изменяться в диапазоне $k_{ТКС} = 0,0002 \dots 0,0037$ Вт/(мм²·К) [5]. Однако, как показали результаты расчета с учетом кратковременности процесса сварки, изменение значений ТКС в указанном диапазоне существенного влияния на кинетику распределения температурных полей не оказывает.

В разработанной модели изменение ТКС между пластинами в процессе сварки с учетом процесса сплавления моделируется следующим образом. Если на каком-либо временном шаге температура в точке контакта превышает температуру плавления, то на данном временном шаге и на всех последующих значение $k_{ТКС}$ равно значению коэффициента теплоотдачи при идеальном контакте. Таким образом в процессе сварочного нагрева определяется максимальный радиус проплавления $R_{пропл}$ между пластинами. Если точка контакта входит в зону проплавления, то на последующих временных шагах значение $k_{ТКС}$ равно

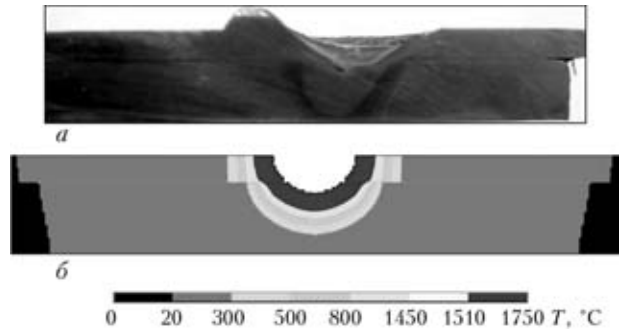


Рис. 3. Макрошлиф точечного сварного соединения (а) и математическая модель, учитывающая выливание части расплавленного металла после прожигающего сварочного цикла (б)

значению коэффициента теплоотдачи при идеальном контакте.

В результате решения температурной задачи определяются температурные поля в свариваемых внахлест пластинах при нагреве и последующем охлаждении, а также форма и размеры зоны проплавления. Разработанная математическая модель нагрева свариваемых внахлест пластин в пространственном положении на вертикальной плоскости учитывает выливание части расплавленного металла во время мощного сварочного цикла, при котором происходит прожигание верхнего листа (рис. 3). Приблизительный объем вылитого расплавленного металла может определяться на основе экспериментальных данных.

Температурная и механическая задачи просматривались последовательно по времени от начала нагрева до полного остывания металла. Распределение температур на каждом временном шаге используется как нагрузка для решения механической задачи по определению напряженно-деформированного состояния на текущем временном шаге с учетом состояния на предыдущем шаге.

Задачу термопластичности решали с помощью теории пластического течения Прандтля–Рейсса, ассоциированной с условием текучести Мизеса. На каждом этапе прослеживания линеаризованную задачу решали методом конечных элементов. Физическую нелинейность реализовали итерационным путем. При этом расчетная модель учитывала зависимость физико-механических свойств стали 09Г2С от температуры (табл. 1). При решении механической задачи конечные элементы в пределах зоны проплавления закрепляются между собой, моделируя таким образом сплавление пластин.

С помощью разработанной модели проведено исследование процесса формирования точечного сварного соединения внахлест двух пластин из стали 09Г2С толщиной 2,5 и 7,0 мм при ДТС в углекислом газе на режиме, состоящем из пяти последовательных сварочных циклов (табл. 2, рис. 4). Сварку выполняли в пространственном положении на вертикальной плоскости, что свя-



Таблица 1. Физико-механические свойства стали 09Г2С*

T, °C	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(мм·°C)	Объемная энтальпия h _{1/3} , Дж/мм ³	Модуль Юнга E·10 ⁻⁵ , МПа	Коэффициент линейного термического расширения α·10 ⁵ , 1/°C	Предел текучести σ _T , МПа
20	0,040	0	1,97	1,14	435
100	0,040	0,5	1,97	1,14	398
200	0,039	1,0	2,01	1,22	360
300	0,038	1,5	1,95	1,26	323
400	0,036	1,7	1,88	1,30	285
500	0,034	2,0	1,80	1,38	222
600	0,032	2,4	1,69	1,39	97
700	0,029	3,2	1,56	1,41	45
800	0,026	4,0	1,35	1,83	43
900	0,026	5,0	1,25	1,87	43
1000	0,028	6,0	1,25	1,94	43
1100	0,029	7,6	1,25	1,95	43
1200	0,030	9,2	1,25	1,95	43
1400	0,030	10,0	1,25	1,95	43
1510	0,030	15,0	1,25	1,95	43
1750	0,030	17,5	1,25	1,95	43

* Коэффициент Пуассона ν = 0,3.

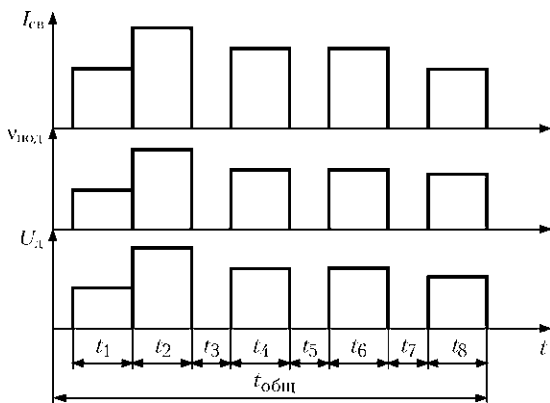


Рис. 4. Схема изменения параметров режима ДТС в вертикальном положении: t₁...t₈ — длительности импульсов и пауз; t_{общ} — общее время цикла ДТС

Таблица 2. Параметры режима ДТС

№ сварочного цикла	Напряжение на дуге U _д , В	Сварочный ток I _{св} , А	Скорость подачи сварочной проволоки v _{под} , м/ч	Длительность сварочного импульса t _{св} , с	Длительность паузы между импульсами t _{пауз} , с
1	28	200	120	0,4...0,5	0,1
2	42	450	276	1,0...1,3	2,0
3	30	250	138	0,8...1,0	1,5
4	30	250	138	0,8...1,0	1,0
5	26	190	120	0,5	—

зано с определенными сложностями формирования сварного соединения.

Коэффициент полезного действия сварочного нагрева выбран равным η = 0,7 на основе данных работы [6], а также из условия согласования размеров зоны проплавления на макрошлифе сварного точечного соединения с расчетными результатами (рис. 5). Коэффициент распределения тепловой мощности k_x = 3,0 1/мм² скорректирован также из этого условия. В первом разогревающем сварочном цикле не моделировали внесение присадочного материала из-за незначительной его продолжительности и последующего выливания расплавленного металла во время второго сварочного цикла. Объем расплавленного металла, вылитого в конце нагрева во время второго сварочного цикла, определяли из условия последующего заполнения присадочным материалом во время третьего и четвертого сварочных циклов.

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов показало, что разработанная математическая модель вполне работоспособна при определении формирования точечного сварного соединения внахлест двух пластин дуговой сваркой в пространственном положении на вертикальной плоскости и может применяться для разработки технологии сварки таких соединений при сложном сварочном цикле.

Указанная математическая модель позволила получить расчетные результаты по распределению остаточных напряжений в зоне сварного соединения. Эта информация может быть полезна при оценке прочности точечного сварного соединения.

Разрушение сварных соединений с точечными швами обычно происходит при разрушении сварных точек по механизму среза (рис. 6) [7, 8]. Возможны и другие механизмы разрушения соединения как по основному металлу или зоне термического влияния, так и вследствие вырыва сварной точки из основного металла по ее периметру. Определяющим является разрушение, которое начинается у вершины полости, примыкающей к сварной точке, и распространяется либо по телу точки либо по основному металлу. Таким образом, разрушение инициируется острым концентратором напряжений, расположенным по периметру сварной точки. Действие указанного концентратора может быть учтено на основе современных критериев механики разрушения, а именно, двухпараметрического критерия вязкох-

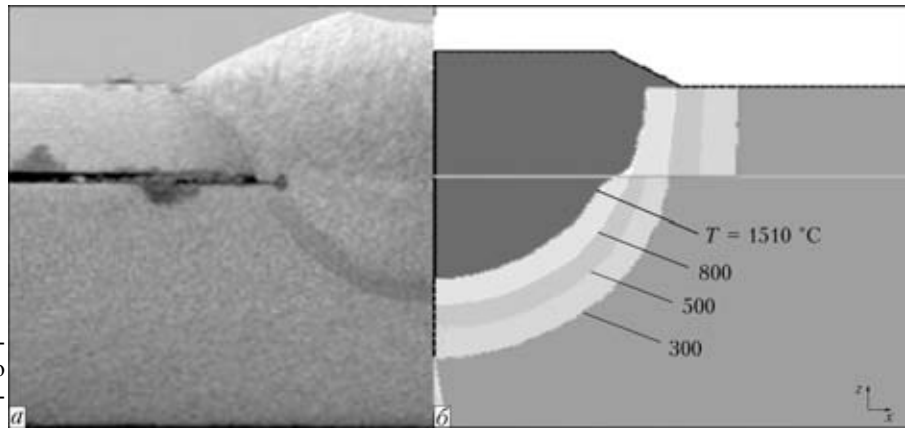


Рис. 5. Сравнение размера зоны проплавления на макрошлифе точечного сварного соединения (а) с расчетными результатами (б)

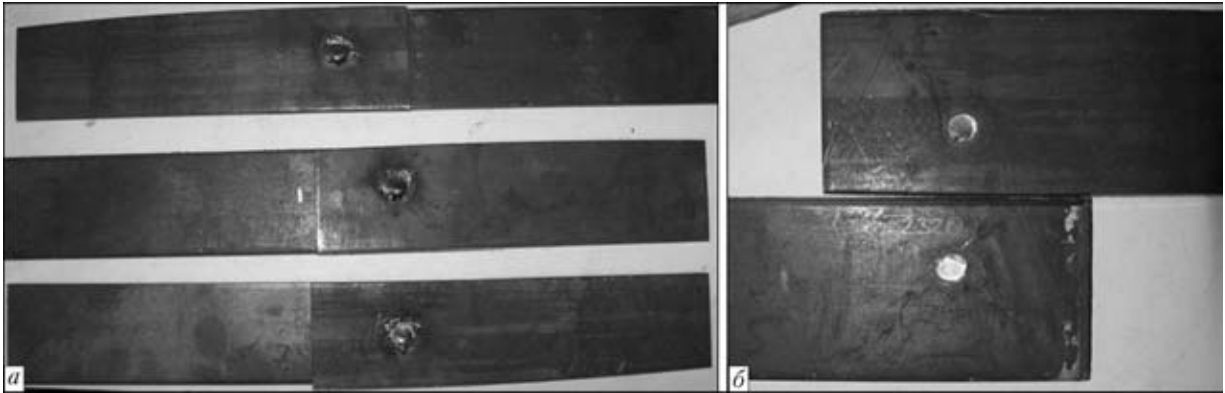


Рис. 6. Вид образцов точечных сварных соединений до испытаний на растяжение (а) и после разрушения сварных точек по механизму среза (б)

рупкого разрушения [9, 10]. Согласно этому подходу равновесие трещины не нарушается, если соблюдается условие

$$K_r \leq f_1(L_r),$$

где $K_r = K_I/K_{IC}$ — отношение интенсивности напряжений K_I в вершине трещины к критическому значению этой величины K_{IC} ; $L_r = \sigma_{\text{реф}}/\sigma_T$ — отношение критического напряжения в зоне сварной точки $\sigma_{\text{реф}}$, определяющего разрушение по механизму пластической неустойчивости, к пределу текучести материала σ_T . Вид функции $f_1(L_r)$ определяется экспериментально. На рис. 7 эти данные приведены для различных конструкционных сталей.

При вычислении значений K_I должны учитываться как внешняя нагрузка, т. е. нагрузка усилием P_x на одну точку в плоскости свариваемых листов (рис. 8), так и остаточные нерелаксированные напряжения в зоне сварного соединения. При вычислении значений L_r остаточные напряжения не учитываются, поскольку они полностью релаксируются.

Значения P_x определяются через напряжения на периферии соединяемых элементов σ_{xx}^∞ (рис. 8, а), значения толщины металла δ_j и шага l между сварными точками, т. е. $P_x = \sigma_{xx}^\infty \delta_j l$ ($j = 1, 2$). В результате нагружения происходит деформирова-

ние соединения (рис. 8, б). При деформировании на сварную точку действуют срезающие усилие $P_x = P_x \cos \beta$, отрывное усилие $P_z = P_x \sin \beta$ и момент

$$M = M_1^0 + M_2^0 = P_x \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \cos \beta.$$

Значения угла β находятся в сложной зависимости от геометрических параметров сварного соединения, механических свойств материалов и усилия P_x . Параметры деформирования точечного сварного нахлесточного соединения и значения

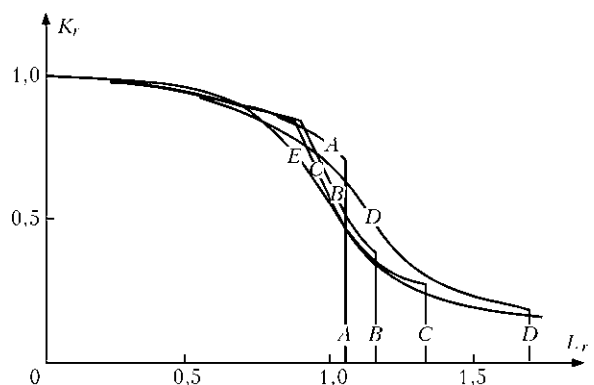


Рис. 7. Диаграммы предельного состояния $K_r \leq f_1(L_r)$ для конструкционных сталей разного типа [3]: А — высокопрочная сталь EN408; В — сталь для сосудов давления А533В; С — низкоуглеродистая сталь с марганцем; D — аустенитная сталь; E — расчетная кривая [9]

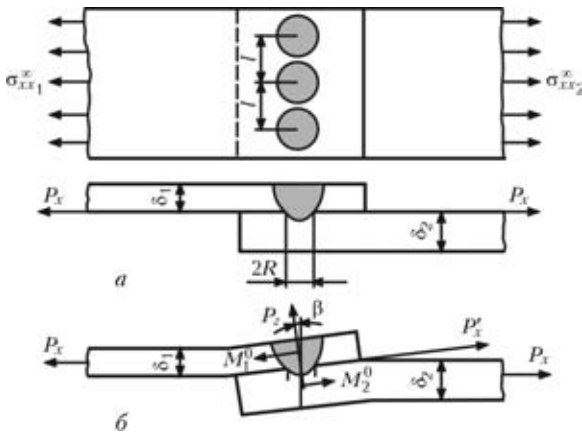


Рис. 8. Схемы сварного соединения с однорядным точечным сварным швом до нагружения (а) и деформирования его при P_x (б); l — расстояние между центрами сварных точек (шаг); P_x' , P_x'' — усилия, действующее в зоне сварной точки; M_1^0 , M_2^0 — усилия, действующее соответственно на верхние и нижние соединяемые листы; β — угол изгиба

K_1 могут быть вычислены по зависимостям, предложенным в работах [11, 12]. По указанным зависимостям выполнены расчетные оценки предельных значений напряжений $(\sigma_{xx}^\infty)_{пр}$ в верхнем более тонком листе при статическом нагружении в зависимости от шага l сварных точек размером $2R$, толщины верхнего δ_1 и нижнего δ_2 листов, а также от остаточных напряжений σ_{zz} в зоне сварной точки.

Расчетные данные, представленные на рис. 9, показывают, что предельные значения напряжений $(\sigma_{xx}^\infty)_{пр}$ при статическом нагружении резко уменьшаются с увеличением шага l сварных точек.

Размер сварной точки также существенно влияет на предельные значения напряжений $(\sigma_{xx}^\infty)_{пр}$ (рис. 10). Увеличение размера сварной точки спо-

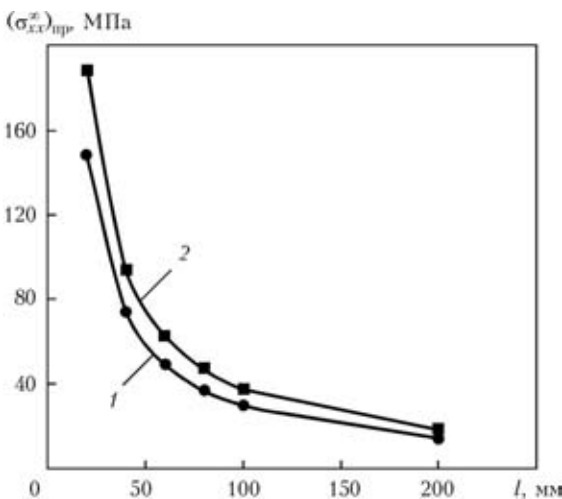


Рис. 9. Расчетные данные об изменении предельных значений напряжений $(\sigma_{xx}^\infty)_{пр}$ в верхнем более тонком листе ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм) при статическом нагружении в зависимости от шага l сварных точек размером $2R = 10$ мм (разрушение срезом): 1 — здесь и на рис. 10, 11 $K_{IC} = 1025$; 2 — $2050 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2}$

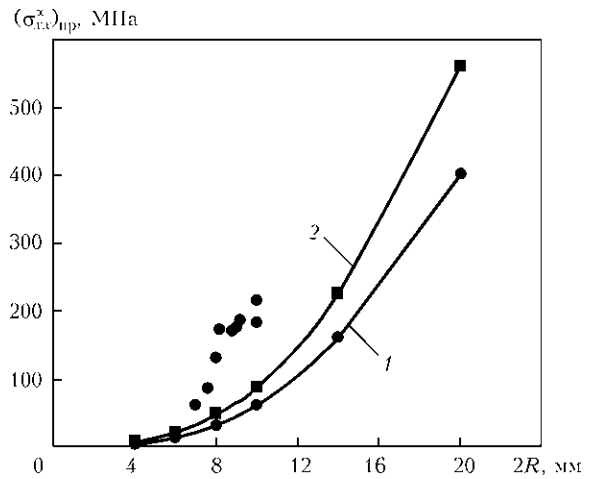


Рис. 10. Сопоставление расчетных (1, 2) и экспериментальных данных (точки) предельных значений напряжений $(\sigma_{xx}^\infty)_{пр}$ в верхнем более тонком листе ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм) при статическом нагружении в зависимости от размера $2R$ сварной точки (шаг $l = 50$ мм)

собствует повышению прочности сварного соединения при статическом нагружении. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных на рис. 10 показало, что применяемый расчетный подход является достаточно консервативным.

Увеличение толщины как верхнего, так и нижнего листа отрицательно влияет на прочность точечного сварного соединения. Этот фактор является отрицательным для усовершенствованной технологии ДТС с многоцикловым сварочным нагревом, которая в основном применяется при сварке достаточно толстых листов.

Расчетные данные на рис. 11 показали, что влияние уровня остаточных напряжений σ_{zz} , действующих по толщине листов в зоне сварной точки, на предельные значения напряжений $(\sigma_{xx}^\infty)_{пр}$ в верхнем более тонком листе при статическом нагружении незначительно. Как видно из рис. 12, уровень остаточных напряжений σ_{zz} достаточно

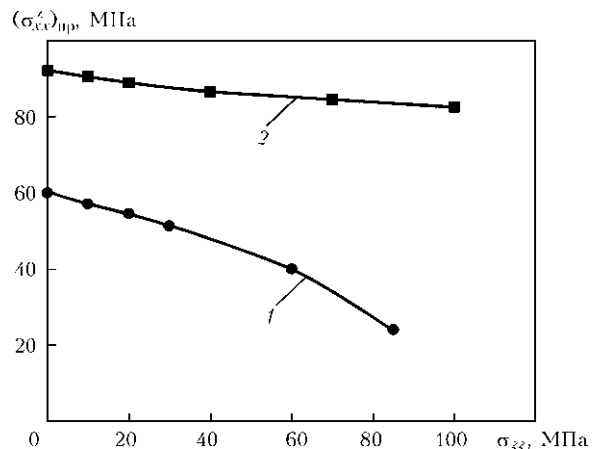


Рис. 11. Изменение предельных значений напряжений $(\sigma_{xx}^\infty)_{пр}$ в верхнем листе ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм) при статическом нагружении в зависимости от остаточных напряжений σ_{zz} (размер сварной точки $2R = 10$ мм, $l = 50$ мм)

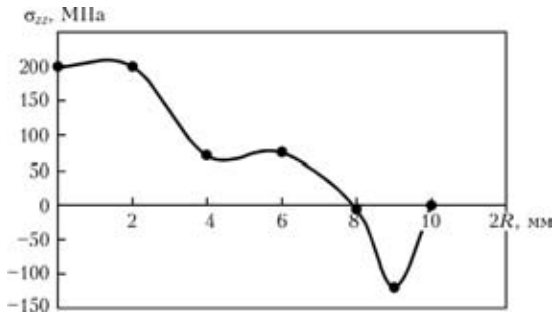


Рис. 12. Расчетные данные о распределении остаточных напряжений σ_{zz} в зоне точечного сварного соединения по линии сплавления свариваемых листов ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм), размер сварной точки $2R = 10$ мм

низкий. В соответствии с уравнением равновесия интеграл нормальных напряжений σ_{zz} по линии (площади) сплавления должен быть равен нулю. На основании этого можно утверждать, что уровень остаточных напряжений не является определяющим фактором прочности точечного сварного соединения при статическом нагружении.

При циклическом нагружении точечного сварного соединения условие предельного состояния может быть сформулировано в виде [13]

$$\Delta K_{\omega}^{\max} = K_{\omega}^{\max} - K_{\omega}^{\min} = \Delta K_{th}^0 (1 - \alpha r_{\sigma}),$$

где максимальные K_{ω}^{\max} и минимальные K_{ω}^{\min} значения определяются соответственно при $P_x = P_x^{\max}$ и $P_x = P_x^{\min}$, r_{σ} — коэффициент асимметрии цикла изменения усилия P_x ; ΔK_{th}^0 — пороговое значение размаха коэффициента интенсивности напряжений K_I ($r_{\sigma} = 0$), при котором распространение трещины нормального отрыва практически не происходит; α — экспериментальная характеристика материала ($\alpha \approx 0,50 \dots 0,85$) [13].

Выполнена расчетная оценка прочности точечного сварного соединения при циклическом нагру-

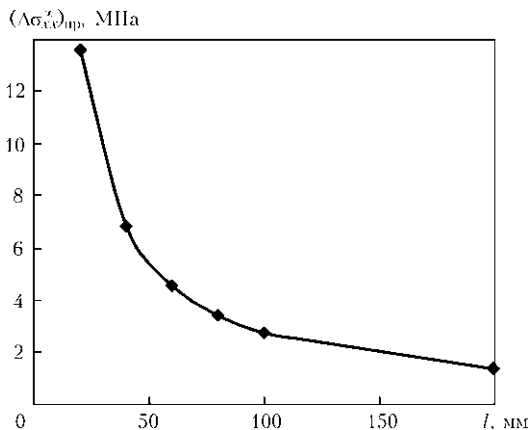


Рис. 13. Изменение предельных значений размаха напряжений $(\Delta\sigma_{xx})_{пр}$ в верхнем более тонком листе ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм) при циклическом нагружении на базе $2 \cdot 10^6$ цикл в зависимости от шага l сварной точки размером $2R = 10$ мм (разрушение срезом)

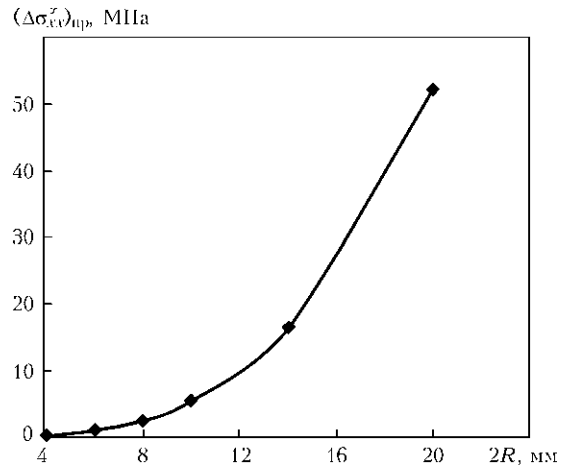


Рис. 14. Изменение предельных значений размаха напряжений $(\Delta\sigma_{xx})_{пр}$ в верхнем более тонком листе ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм) при циклическом нагружении на базе $2 \cdot 10^6$ цикл в зависимости от размера сварной точки $2R$ ($l = 50$ мм)

жении в зависимости от шага l и размера $2R$ сварной точки, толщины верхнего δ_1 и нижнего δ_2 листов при консервативном значении коэффициента асимметрии цикла $r_{\sigma} = 0$ и $\Delta K_{th}^0 = 190$ МПа·мм^{1/2}. Расчетные данные рис. 13 и 14 показали, что эта зависимость имеет такой же характер, как и при статическом нагружении. Однако по предельным значениям размах напряжений при циклическом нагружении на базе $2 \cdot 10^6$ цикл приблизительно на порядок ниже (на уровне 10...20 МПа), чем при статическом нагружении, что согласуется с современным представлением о циклической прочности сварных соединений.

Выводы

1. Путем регулирования параметров сварочных циклов при ДТС тонколистового металла в вертикальном положении обеспечивается получение высококачественных точечных соединений. Усовершенствованная технология предоставляет новые возможности применения ДТС конструкций в различных отраслях промышленности, особенно при изготовлении каркасных конструкций современных грузовых и пассажирских вагонов.

2. Разработанная математическая модель может эффективно применяться при разработке технологии ДТС соединений внахлест, в том числе при сложном сварочном цикле.

3. Как показали полученные расчетные данные, уровень остаточных напряжений σ_{zz} , действующих по толщине листов в зоне сварной точки, достаточно низкий. В соответствии с уравнением равновесия интеграл нормальных напряжений σ_{zz} по линии (площади) сплавления равен нулю. Следовательно, уровень остаточных напряжений не является определяющим фактором для прочности точечного сварного соединения при статическом нагружении.



4. Предельные значения напряжений (σ_{xx}^{∞})_{пр} при статическом нагружении и размаха напряжений ($\Delta\sigma_{xx}^{\infty}$)_{пр} при циклическом нагружении резко падают с увеличением шага сварных точек.

5. Увеличение размера сварной точки способствует существенному повышению прочности сварного соединения как при статическом, так и циклическом нагружении.

1. Особенности дуговой точечной сварки плавящимся электродом в углекислом газе / В. И. Терещенко, А. Н. Шаровольский, К. А. Сидоренко и др. // Автомат. сварка. — 1983. — № 9. — С. 51–53.
2. Ткаченко А. Н., Воскресенский А. С. Применение дуговой точечной сварки при изготовлении кузовов вагонов // Там же. — 2005. — № 12. — С. 26–28.
3. ГОСТ 14776–79. Дуговая сварка. Соединения сварные точечные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. — Введ. 01.07.80.
4. Лобанов Л. М., Тимошенко А. Н., Гончаров П. В. Дуговая точечная сварка нахлесточных соединений в вертикальном положении // Автомат. сварка. — 2009. — № 1. — С. 34–37.

5. Lienhard J. IV, Lienhard J. V. Heat transfer textbook. — Cambridge, Massachusetts: Phlogiston Press, 2002. — 746 p.
6. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
7. Дорофеев А. Н. Расчет прочности точечных соединений. — М.: Машиностроение, 1964. — 139 с.
8. Серенко А. И., Крумбольдт М. Н., Багрянский К. В. Расчет сварных соединений и конструкций. — Киев: Виш. шк., 1977. — 333 с.
9. Assessment of the integrity of structure containing defects / R. P. Harrison, K. Loosmore, J. Milne et al. // Central Electricity Generating Board. — Berkley, 1980. — Report 6. Rev. 2.
10. Махненко В. И., Починок В. Е. Применение критериев механики разрушения к расчету на прочность сварных соединений с предусмотренными несплошностями трещинообразного типа // Автомат. сварка. — 1982. — № 1. — С. 1–6.
11. Махненко В. И., Рябчук Т. Г., Починок В. Е. Совершенствование методики расчета на прочность сварных соединений с точечными швами // Там же. — 1990. — № 1. — С. 9–14.
12. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
13. Махненко В. И., Починок В. Е. Сопротивление циклическим нагрузкам сварных соединений, имеющих швы с неполным проплавлением // Автомат. сварка. — 1984. — № 10. — С. 33–40.

Mathematical modelling of the metal-arc spot welding process was carried out by the thermoplasticity method combined with the final element method to estimate the possibility of improving the welding technology. Performance of a spot welded joint under static and alternating loads was evaluated based on the data on sizes of the fusion zone and level of residual stresses within the spot weld zone.

Поступила в редакцию 11.11.2010



11-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА ОБОРУДОВАНИЯ, ПРИБОРОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ СВАРКИ И РЕЗКИ

22–25 марта 2011

Беларусь, Минск
Выставочный комплекс

В рамках выставки будет работать специализированный салон
Защита от коррозии. Покрытия.

Организатор: МинскЭкспо тел.: +375 17-226-98-58, 17-226-90-83
факс: +375 17-226-98-58, 17-226-99-36
E-mail: e_fedorova@solo.by