

В.П. Сидоров, доктор технических наук, профессор
А.В. Мельзитдинова, магистр-инженер, старший преподаватель
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: качество сварного соединения; стабилизация размеров сварного шва; температура поверхности детали; возмущающий фактор; математическая модель; отклонения параметров сварки; двухсторонняя аргонодуговая сварка; относительный коэффициент передачи возмущений.

Аннотация: Предложена методика определения температуры в зоне сварки, учитывающая влияние различных возмущений, на основании которой произведен расчет температур поверхности пластин из высоколегированной стали, свариваемых двухсторонней аргонодуговой сваркой без разделки кромок. Рассчитан термический цикл выбранной точки на наружной поверхности детали на расстоянии $y=0,6$ см от оси источника нагрева и получена точка с максимальной температурой ($x=0,7$ см), для которой определено влияние допустимых отклонений от номинальных значений условий сварки (температуропроводность, толщина пластины) и режимов сварки (эффективная мощность и скорость сварки). Приведены значения относительного коэффициента передачи возмущений (ОКПВ). Он представляет реакцию регулируемого параметра на изменение регулирующего в относительных единицах при отсутствии системы регулирования. Установлено, что при регулировании температуры точки относительное влияние скорости сварки превышает влияние эффективной мощности, в то время как при регулировании непосредственно провара различия почти нет. Поэтому в качестве регулирующего параметра целесообразнее использовать скорость сварки, так как она не оказывает влияния на мощность дуги и не взаимодействует в системе «источник питания – дуга – сварочная ванна». По предложенной методике проведено также исследование изменения температуры точки с координатой, при которой имеет место максимальный провар ($y=0,6$ см, $x=1,1$ см), и точки с координатами $y=0,8$ см и $x=1,1$ см. На основе сравнительного анализа полученных результатов для регулирования процесса сварки предпочтительнее выбор точки с максимальным проваром, так как отклонения провара и температуры в данной точке совпадают по времени.

ВВЕДЕНИЕ

Качество сварного соединения определяется его механическими, коррозионными и иными свойствами, зависящими от геометрических размеров и формы сварочного шва. Стабилизация геометрических размеров шва способствует повышению качества сварного соединения. В большинстве случаев при сварке практически невозможно контролировать и регулировать геометрические размеры сварочной ванны. В необходимых случаях можно контролировать температуру в зоне термического влияния шва [1]. Таким образом, одним из важнейших факторов получения качественного сварного соединения является подбор и поддержание необходимого температурного режима [2]. Определение температуры поверхности металла может производиться либо с помощью контактного термометра, либо посредством пирометров [3]. Для подбора оптимальных характеристик датчика температуры для регулирования размеров сварочной ванны необходимо исследование связи между температурами на поверхности детали и размерами ванны [4; 5]. Наиболее рационально основной объем исследований выполнить теоретически, а уточнение произвести с помощью необходимых экспериментов [6]. Поэтому разработка методики определения температуры в зоне сварки, учитывающей влияние различных возмущений, весьма актуальна.

Цель работы заключается в повышении качества сварных соединений за счет стабилизации температурного режима сварки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ

С помощью математической модели [7–9], основанной на формуле для температуры от нормально-кругового источника тепла на поверхности плоского

слоя, адекватность которой показана в работе [10], можно рассчитать температуру поверхности металла на определенном расстоянии от оси источника нагрева, а также проследить изменения значений температуры при отклонениях параметров сварки.

Производили расчет температур [11] для способа двухсторонней аргонодуговой сварки пластин из высоколегированной стали без разделок кромок. Ранее в работе [12] были рассчитаны допустимые отклонения условий и режимов сварки при параметрах процесса, приведенных в таблице 1. В качестве регулируемого параметра [13; 14] был выбран номинальный провар изделия при сварке одного из двух швов. Значение такого провара принималось 60 % от свариваемой толщины детали 6 мм [15] и составило $H=3,6$ мм (рис. 1). Положительные значения x в нашем случае противоположны направлению скорости движения источника. Допустимое отклонение принимали $\pm 0,6$ мм от номинального провара. Таким образом, минимально допустимый провар составил 3,0 мм, а максимально допустимый провар 4,2 мм. Следовательно, допустимое относительное отклонение регулируемого параметра $[\Delta H/H]=\pm 16,7$ %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассчитывали термический цикл [16] выбранной точки на наружной поверхности детали на расстоянии $y=0,6$ см от оси источника нагрева.

Температура возрастает и достигает своего максимума 995 °С в точке $x=0,7$ см. Таким образом, точка в нагреваемой зоне быстро нагревается до максимальной температуры, а затем охлаждается вследствие теплоотвода, причем по мере снижения температуры скорость охлаждения уменьшается (рис. 2).

Таблица 1. Номинальные значения параметров процесса сварки

Параметр	C , Дж/(см ³ °С)	q , Вт	q_0 , Вт/см ²	a , см ² /с	V_c , см/с	T_0 , °С	T , °С
Значение	3,476	1800	4200	0,0432	0,43	20	1440

Примечание. C – объемная теплоемкость, Дж/см³°С; q – эффективная тепловая мощность, Вт; q_0 – плотность теплового потока, Вт/см²; a – температуропроводность, см²/с; V_c – скорость сварки, см/с; T_0 – начальная температура детали, °С; T – температура плавления, °С.

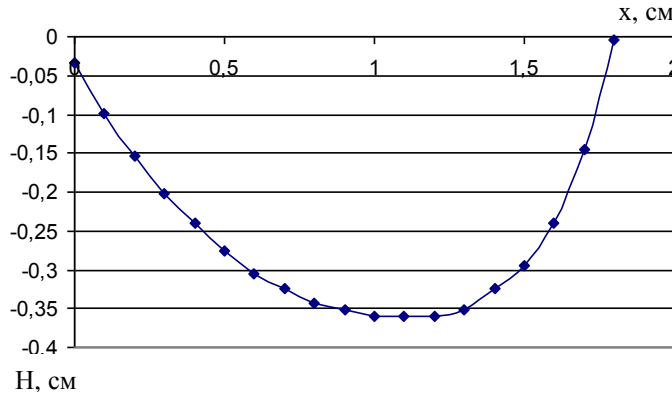


Рис. 1. Продольная изотерма плавления для номинального режима

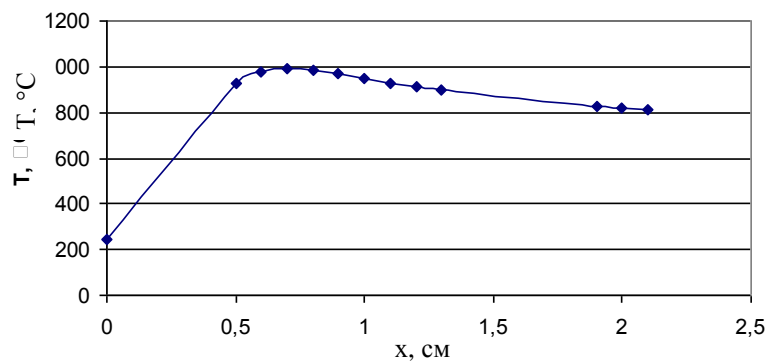


Рис. 2. Термический цикл при номинальных параметрах сварки: $y=0,6$ см

Для дальнейшего исследования была выбрана точка с максимальной температурой при координате $x=0,7$ см. Можно определить, как влияет допустимое отклонение каждого из параметров процесса сварки от номинальных значений (таблица 2), рассчитанных в работе [12], на полученную точку максимальной температуры T_{max} . В таблице 2 приведены также значения предложенного в работе [12] относительного коэффициента передачи возмущений (ОКПВ). Он представляет реакцию регулируемого параметра на изменение регулирующего в относительных единицах при отсутствии системы регулирования. Чем больше значение ОКПВ, тем более опасным является данный возмущающий фактор.

В таблице 3 приведены значения отклонений максимальной температуры в точке при отклонениях параметров процесса, приведенных в таблице 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По таблице 3 можно сделать выводы, что наибольшее относительное отклонение от номинального значения для температуры вызывает изменение температуропроводности и эффективной мощности, а наименьшее влияние – изменение толщины пластины в допустимых пределах. Для эффективной мощности относительное отклонение температуры несколько возросло, в то время как для скорости сварки, наоборот, уменьшилось.

Таблица 2. Значения параметров процесса при достижении допустимых отклонений провара

Параметр	q , Вт		V_c , см/с		T , °С		a , см ² /с		δ , см	
	+ ΔH	- ΔH	+ ΔH	- ΔH	+ ΔH	- ΔH	+ ΔH	- ΔH	+ ΔH	- ΔH
Значение	1980	1550	0,39	0,50	1530	1210	0,02	0,07	0,57	0,66
ΔH , %	10	13,9	9,3	16,3	6,25	16	53,7	62	5	10
ОКПВ	1,67	1,20	1,80	1,02	2,67	1,04	0,31	0,27	3,34	1,67

Примечание. + ΔH – для положительных отклонений H , - ΔH – для отрицательных отклонений H .

Таблица 3. Относительные отклонения максимальной температуры при $y=0,6$ см, $x=0,7$ см

Параметр	+q	-q	+V	-V	+a	-a	+ δ	- δ
ΔT , %	+14,5	-18,9	-7,8	+12,4	-23,1	+9,5	-0,8	+0,9
ОКПВ	1,15	0,88	2,14	1,35	0,72	1,76	20,88	18,56

Примечание. Номинальная температура в точке 995 °С.

Соответственно происходят изменения ОКПВ. Причем отрицательные отклонения режимов сварки (мощности и скорости) приводят к большему относительному изменению температуры в выбранной точке. Это связано с особенностями распространения тепла в пластине в условиях двухсторонней сварки, когда влияет отражение тепла от обратной плоскости пластины [17]. При двухсторонней сварке более опасны возмущения, приводящие к уменьшению провара, так, возникновение непровара значительно вероятнее возникновения прожога [18; 19]. При регулировании температуры точки относительное влияние скорости сварки почти в 2,5 раза превышает влияние эффективной мощности, в то время как при регулировании непосредственно провара различия почти нет. Этот факт необходимо учитывать при создании системы регулирования температуры [20].

Следует также отметить, что допустимые положительные и отрицательные относительные отклонения параметров сопоставимы с отклонениями регулируемого параметра, поэтому слежение за температурой в выбранной точке перспективно для автоматического регулирования. Уменьшение ОКПВ для температуры по сравнению с ОКПВ для провара (эффективная мощность) свидетельствует об уменьшении чувствительности при регулировании. Для скорости сварки, наоборот, происходит увеличение чувствительности при регулировании температуры, т. к. ОКПВ возрастают. Поэтому скорость сварки более целесообразно использовать в качестве регулирующего параметра, чем эффективную мощность.

Более правильным представляется выбор, когда в качестве точки контроля температуры на наружной поверхности точки с координатой x , при которой имеет место максимальный провар (рис. 1). Такую координату можно принять $x=1,1$ см. Температура в этой точке ниже, чем в первой. Данные расчетов приведены в таблице 4.

Относительные отклонения температуры изменились незначительно, однако вторая точка предпочтительнее, из-за того что отклонения провара и температуры в данной точке совпадают по времени. Различия во влиянии мощности и скорости сварки уменьшилось по сравнению с ранее исследованной точкой, что указывает на предпочтительность выбора координаты x с максимальным проваром.

Также были произведены расчеты по предложенной методике для точки с координатами $y=0,8$ см и $x=1,1$ см (таблица 5).

Температура последней точки снизилась примерно в 2 раза. Сравнив таблицу 4 и таблицу 5, видим, что при увеличении расстояния между точками на наружной поверхности свариваемой детали от оси шва влияние абсолютных допустимых отклонений эффективной мощности и толщины детали практически не изменяется, в то время как влияние скорости сварки и температуропроводности имеет значительный прирост.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Допустимое относительное отклонение провара и относительные отклонения температур в области близкой к шву на поверхности изделия существенно отличаются для условий сварки (температуропроводности и толщины материала), а для режимов (мощности и скорости сварки) имеют близкие значения. Это позволяет использовать режимы для стабилизации провара при контроле температуры поверхности детали.

2. Предложенная методика сопоставления относительных отклонений регулируемого параметра и температуры поверхности детали позволяет выбрать точку, оптимальную для регулирования процесса сварки.

3. Эффективная мощность дуги и скорость сварки могут с близкой эффективностью использоваться

Таблица 4. Относительные отклонения температуры в точке $y=0,6$ см, $x=1,1$ см

Параметр	+q	-q	+V	-V	+a	-a	+ δ	- δ
ΔT , %	+12,8	-16,5	-10,7	+7,6	-10,9	+20,7	-2,4	+1,7
ОКПВ	1,30	1,01	1,56	2,20	1,53	0,81	6,96	9,82

Примечание. Номинальная температура 929 °С.

Таблица 5. Изменение значения T_{max} при положительных и отрицательных абсолютных допустимых отклонениях параметров сварки при $y=0,8$ см и $x=1,1$ см

Параметр	q+	q-	V+	V-	a+	a-	δ +	δ -
ΔT , %	+12,0	-15,0	-13,9	+19,1	-39,4	+12,4	-2,0	+3,0
ОКПВ	1,39	1,11	1,2	0,87	0,42	1,35	8,35	5,57

Примечание. Номинальная температура в точке 498 °С.

в качестве регулирующих параметров. Однако на практике целесообразнее использовать скорость сварки, так как она не оказывает влияния на мощность дуги и не взаимодействует в системе «источник питания – дуга – сварочная ванна» [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке. М.: Академия, 2006. 432 с.
2. Сидоров В.П. Методика определения точности поддержания режима при точечной контактной сварке // Сварочное производство. 2008. № 9. С. 18–22.
3. Андреева Л.И. Температурные измерения в металлообработке // ТЕХНОАС. Контрольно-измерительные приборы. URL: technoac.ru/news/articles/temperature-in-metal. (Дата обращения: 16.02.2015).
4. Сидоров В.П., Семистенов Д.А. Математическое моделирование геометрии шва при сварке конструкционных сплавов и биметаллов. Тольятти: ТГУ, 2009. 175 с.
5. Антонен Д.П., Псарас Г.Г. Экспериментальное определение веса, формы и размеров сварочной ванны // Сварочное производство. 1970. № 5. С. 43–44.
6. Павлов Н.В., Чинахов Д.А., Ильященко Д.П. Сравнительный анализ расчетных значений распределения температур при сварке с экспериментальными // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). 2010. Т. 3. № 12. С. 433–438.
7. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987. 240 с.
8. Математическое моделирование сварочных процессов в пакете FEMLAB 3.0 / Р.А. Мусин [и др.] // Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение. 2010. Т. 12. № 4. С. 7–16.
9. Сараев Ю.Н., Кректулева Р.А., Косяков В.А. Математическое моделирование технологических процессов импульсной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом // Сварочное производство. 1997. № 4. С. 2–4.
10. Сидоров В.П., Хурин С.А. Моделирование провара при дуговой сварке стыковых соединений без разделки кромок // Сварка и Диагностика. 2011. № 6. С. 36–42.
11. Сидоров В.П. Математическая модель распространения тепла при контактной точечной сварке // Сварка–XXI век: Теория и методика, повышение качества профессионального образования и аттестация специалистов сварочного производства: материалы Всерос. научн.-техн. конф. Тольятти: ТГУ, 2002. С. 147–150.
12. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Методика определения требований к точности параметров сварки // Сварка и Диагностика. 2014. № 3. С. 10–13.
13. Бадьянов Б.Н., Елизаров А.А., Колупаев Ю.Ф. Управление процессом сварки в режиме реального времени // Сварка на рубеже веков: тезисы докладов научн.-техн. конф. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. С. 30.
14. Букаров В.А. Разработка моделей управления дуговой сваркой в защитных газах // Сварочное производство. 1997. № 2. С. 13–17.
15. ГОСТ 14771–76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1976. 37 с.
16. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке. М.: МАШГИЗ, 1951. 296 с.
17. Сидоров В.П. Теория и технология сварочных процессов. 2-е изд. Тольятти: ТГУ, 2009. 228 с.
18. Попков А.М. Расчет параметров режима дуговой сварки стыковых соединений по заданным геометрическим параметрам швов // Сварочное производство. 2003. № 9. С. 33–35.
19. Машиностроение : энциклопедия. В 40 т. Т. IV-6. Оборудование для сварки / В.К. Лебедев [и др.]. М.: Машиностроение, 1999. 496 с.
20. Львов Н.С., Гладков Э.А. Автоматика и автоматизация сварочных процессов. М.: Машиностроение, 1982. 302 с.
21. Николаев Г.А. Сварка в машиностроении. М.: Машиностроение, 1979. 512 с.

REFERENCES

1. Gladkov E.A. *Upravlenie protsessami i oborudovaniem pri svarke* [Control of processes and equipment during welding]. Moscow, Akademiya publ., 2006, 432 p.
2. Sidorov V.P. Methods for determination of mode accuracy during the spot contact welding. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2008, no. 9, pp. 18–22.
3. Andreeva L.I. Temperature measurements in metalworking. *TEKHOAS*. URL: technoac.ru/news/articles/temperature-in-metal.
4. Sidorov V.P., Semistenov D.A. *Matematicheskoe modelirovanie geometrii shva pri svarke konstruktivnykh splavov i bimetallov* [Mathematical modeling of weld geometry in welding of structural alloys and bimetals]. Tolyatti, TGU publ., 2009, 175 p.
5. Antonets D.P., Psaras G.G. Experimental determination of weight, shape and size of welding pool. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1970, no. 5, pp. 43–44.
6. Pavlov N.V., Chinakhov D.A., Ilyashchenko D.P. Comparative analysis of calculated values of welding temperature distribution and experimental values. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*, 2010, vol. 3, no. 12, pp. 433–438.
7. Dyakonov V.P. *Spravochnik po algoritmam i programam na yazyke Beysik dlya personalnykh EVM* [Reference book on algorithms and BASIC software for personal computers]. Moscow, Nauka publ., 1987, 240 p.
8. Musin R.A., Trushnikov D.N., Shkurikhin V.A., Putin Yu.A. Mathematical modeling of welding processes in the package FEMLAB 3.0. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2010, vol. 12, no. 4, pp. 7–16.
9. Saraev Yu.N., Krektuleva R.A., Kosyakov V.A. Mathematical modeling of processes of pulse argon-arc welding with non-consumable electrodes. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 4, pp. 2–4.

10. Sidorov V.P., Khurin S.A. Weld penetration modeling during arc welding of butt joints without edge preparation. *Svarka i diagnostika*, 2011, no. 6, pp. 36–42.
11. Sidorov V.P. Mathematical model of heat distribution during spot contact welding. *Materiali Vseros. nauchno-tekhn. konf. "Svarka–XXI vek: teoriya i metodika, povishenie kachestva professionalnogo obrazovaniya i attestatsiya spetsialistov svarochnogo proizvodstva"*. Tolyatti, TGU publ., 2002, pp. 147–150.
12. Sidorov V.P., Melzitdinova A.V. Procedure of determination of requirements for welding parameters accuracy. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 3, pp. 10–13.
13. Badyanov B.N., Elizarov A.A., Kolupaev Yu.F. Welding process control in on-line mode. *Tezisi dokladov nauchno-tekhn. konf. "Svarka na rubezhe vekov"*. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman publ., 2002, p. 30.
14. Bukarov V.A. Development of models of arc gas-shielding welding control. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 2, pp. 13–17.
15. GOST 14771–76. *Gas-shielded arc welding. Welded joints. Main types, design elements and dimensions*. Moscow, Standartinform Publ., 1976, 37 p. (In Russian).
16. Rykalin N.N. *Raschet teplovikh protsessov pri svarke* [Calculation of thermal processes during welding]. Moscow, MASHGIZ publ., 1951, 296 p.
17. Sidorov V.P. *Teoriya i tekhnologiya svarochnikh protsessov* [Theory and technology of welding processes]. 2nd ed. Tolyatti, TGU publ., 2009, 228 p.
18. Popkov A.M. Calculation of mode parameters of butt joints arc welding according to the specified geometrical parameters of seams. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2003, no. 9, pp. 33–35.
19. Lebedev V.K. et al. *Mashinostroenie* [Mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1999, vol. IV-6, 496 p.
20. L'vov N.S., Gladkov E.A. *Avtomatika i avtomatizatsiya svarochnikh protsessov* [Automatics and automation of welding processes]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1982, 302 p.
21. Nikolaev G.A. *Svarka v mashinostroenii* [Welding in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1979, 512 p.

THE RESEARCH OF TEMPERATURE DEVIATIONS IN WELDING PROCESS DURING THE DISTURBING ACTIONS

© 2015

V.P. Sidorov, Doctor of Engineering, Professor
A.V. Melzitdinova, master-engineer, senior lecturer
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: welded joint quality; weld seam dimensional stabilization; part surface temperature; disturbing factor; mathematical model; deviations in the welding parameters; double argon-arc welding; relation coefficient of disturbance transmission.

Abstract: The authors offered the methods for determining temperature in the welding zone, taking into account the influence of various disturbances. Basing on these methods, the surface temperature of the heat-resistant steel plates welded by double argon-arc welding without cutting edges is calculated. The authors calculated the thermal cycle of selected point on the outer surface of a part at the distance $y=0,6$ cm from the axis of the heating source and obtained the point with the maximum temperature ($x=0,7$ cm), for which the influence of permitted deviations in the nominal values of welding conditions (thermal diffusivity, plate thickness) and welding modes (effective power and welding speed) are determined. The article gives the values of relation coefficient of disturbance transmission (RCDT). It is the controlled parameter reaction for the change in controlling parameter in relative units in the absence of controlling system. It was found that while controlling the point temperature, the relative influence of welding speed exceeds the influence of effective power while in case of regulation of direct weld penetration there is almost no difference. It is advisable to use the welding speed as the controlling parameter since it does not influence the arc power and does not react in the "power source – arc – welding pool" system. According to the proposed method, the study of temperature change of a point with the coordinate at which the maximum penetration takes place ($y=0,6$ cm, $x=1,1$ cm) and a point with $y=0,8$ cm, $x=1,1$ cm. On the basis of the results comparative analysis, to regulate the welding process, it is preferable to select a point with maximum weld penetration as the penetration and temperature deviations at a given point coincide in time.