

## Применение концентрированного солнечного излучения для сварки металлов

Академик Н. Н. РЫКАЛИН, д-р техн. наук А. А. УГЛОВ и инж. Г. В. СМОЛЬСКИЙ

Одно из основных достоинств использования концентрированного солнечного излучения для технологических процессов — минимальное потребление электроэнергии, необходимое только для работы системы автоматического слежения за Солнцем и перемещения обрабатываемых материалов. Применение концентрированного солнечного излучения для сварки металлов открывает возможность получения относительно простыми средствами сравнительно высоких плотностей лучистой энергии, бесконтактного подвода энергии к образцу, чистоты условий обжига; кроме того, обеспечивает ведение процесса в атмосфере любых контролируемых газов или в вакууме, высокую управляемость, позволяющую легко и по любому закону изменять степень облученности образца.

Общие вопросы, связанные с применением концентрированной солнечной энергии для сварки, а также некоторые результаты исследований процесса сварки металлов в защитных газах с помощью этой энергии освещены в работах [1—5].

В данной статье приведены результаты экспериментальных работ по сварке металлов в вакууме, а также расчеты температурных полей вблизи пятна нагрева при воздействии концентрированного солнечного излучения на плоские неподвижные пластины.

Сварку пластин из стали 12Х18Н10Т (толщиной 1,0 мм), а также пластин из сплава ОТ4 (толщиной 1,0 и 1,5 мм) в вакууме проводили на универсальной солнечной печи УСП-1,5 с концентратором диаметром 1,5 м и слежением за Солнцем через гелиостат. Печь имеет следующие энергетические параметры, определенные экспериментально при солнечной радиации 670 Вт/м<sup>2</sup>: тепловую мощность  $Q=800$  Вт, коэффициент сосредоточенности  $k=4,35$  см<sup>-2</sup>, максимальную плотность потока энергии в пятне  $q_{2m}=1100$  Вт/см<sup>2</sup>. Значение  $Q$  определяли на шаровом калориметре, а значения  $k$  и  $q_{2m}$  — на радиационном микрокалориметре, использующем дифференциальную медь-константановую термопару с диаметром медного стержня 1,0 мм.

Схема вакуумной камеры для сварки представлена на рис. 1. Свариваемые образцы 1 устанавливали на жесткую подкладку 2 из латуни и плотно поджимали к ней с помощью прижимов 3. Назначение подкладки — обеспечить жесткость и отсутствие ко-

робления пластин во время сварки, а также повышение скорости охлаждения (возможна сварка и без подкладки). В процессе сварки подкладка вместе с установленными на ней пластинами перемещалась с помощью пары ходовой винт 4 — гайка 5. Излучение вводилось в камеру через стеклянную полусферу 6 из отожженного молибденового стекла.

Характерной особенностью сварки в вакуумной камере является запыление парами металла стеклянной полусферы, что значительно уменьшает коэффициент пропускания излучения. В связи с тем, что с повышением вакуума запыление возрастает, эксперименты проводили при вакууме 1,33 Па. В этом случае общий коэффициент пропускания полусферой за счет запыления, поглощения и отражения к концу сварки составлял 0,45—0,55.

В табл. 1 приведены режимы сварки как с помощью солнечной энергии, так и (для сравнения) другими способами. Видно, что скорости сварки при использовании солнечного излучения значительно ниже, а погонная энергия соответственно выше. Однако при сварке с помощью солнечного излучения уменьшается опасность прожогов тонкого листа из-за практического отсутствия давления излучения на сварочную ванну. Полученные швы имели блестящую серебристую поверхность без трещин. Для определения механических свойств сварных соединений проводили испытания на статические растяжение и изгиб, а также твердость. Испытания показали, что по прочности и углу изгиба соединения из стали 12Х18Н10Т, полученные сваркой с помощью солнечного излучения в вакууме, не уступают соединениям, полученным другими способами. Вместе с тем, повышенная погонная энергия приводит к некоторому укрупнению структуры, что снижает относительное удлинение при растяжении.

Предел прочности соединений из сплавов ОТ4, полученных с помощью солнечной энергии в вакууме, составляет 85% (при толщине 1,0 мм) и 65% (при толщине 1,5 мм) от минимального гарантируемого предела прочности сплава ОТ4, что ниже предела прочности соединений этого сплава, полученных другими способами. Вместе с тем, соединения сплава ОТ4, полученные рассматриваемым способом сварки, имеют значительно больший угол изгиба. Снижение прочности и повышение пластичности сплава ОТ4 можно объяснить значительным уменьшением содержания газов в металле шва и замедленным охлаждением.

В табл. 2 приведены результаты механических испытаний сварных соединений, полученных солнечным излучением в вакууме, а также другими способами. Твердость металла швов практически не отличается от твердости основного металла, как и химический состав по основным легирующим элементам. Структура металла шва аустенитно-ферритная с содержанием ферритной фазы в пределах 1—9% (строение дендритное). Швы сплава ОТ4 имеют крупнопластинчатое строение, характерное для  $\alpha'$ -фазы.

Таким образом, результаты экспериментов по сварке с помощью солнечной энергии в вакууме стали 12Х18Н10Т и сплава ОТ4 показали, что данный способ обеспечивает достаточно высокие механические

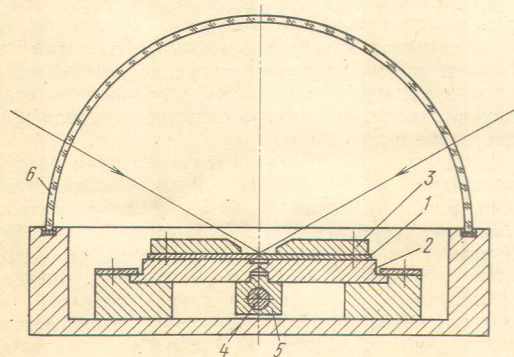


Рис. 1. Схема вакуумной камеры для сварки плоских образцов

Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных температур при нагреве пластины из нержавеющей стали на латунной подкладке ( $r$  — расстояние от центра пятна нагрева):  
1 —  $q_{2m}=1,1$  кВт/см<sup>2</sup>,  $k=1,1$  см<sup>-2</sup>,  $l=0,3$  см;  
2 —  $1,1$  кВт/см<sup>2</sup>,  $4,35$  см<sup>-2</sup>,  $0,3$  см; 3 —  $2,3$  кВт/см<sup>2</sup>,  $67,7$  см<sup>-2</sup>,  $0,12$  см

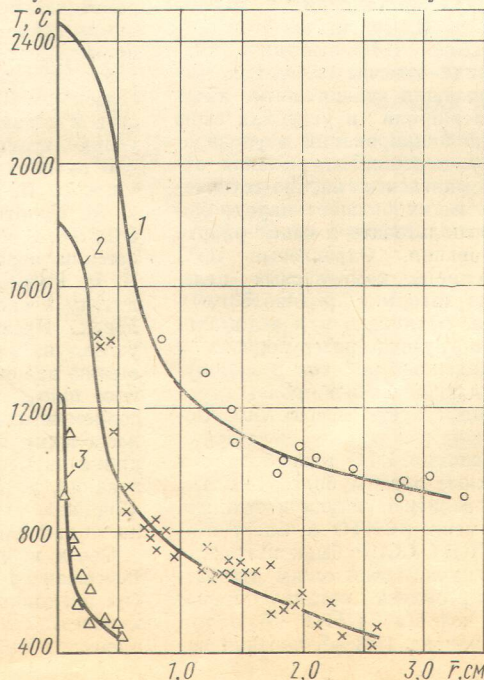


Таблица 1

Свариваемый металл (толщина, мм)	Вид сварки	Эффективная мощность, Вт	Скорость сварки, м/ч	Погонная энергия, кал/см
12Х18Н10Т (1,0)	СКСИВ	350—400	2,2—2,9	1100—1400
	РАрДС	500—600	15,0—25,0	200—350
	АСУГ	1000—1250	35,0—55,0	200—250
ОТ4 (1,0)	СКСИВ	350—400	2,2—2,5	1100—1400
	РАрДС	650	2,2—2,5	1100—1400
	ААрДС	950—1000	25,0—40,0	250—350
	АДИС	700—1000	28,0—25,0	300—350
ОТ4 (1,5)	СКСИВ	400—450	0,9—1,1	2500—3500
	РАрДС	600—750	0,9—1,1	2500—3500
	ААрДС	1000—1200	25,0—40,0	250—350
	АДИС	1500—1700	16,0—24,0	650—800

Примечание. СКСИВ — сварка концентрированным солнечным излучением в вакууме; РАрДС — ручная аргодуговая сварка; АСУГ — автоматическая сварка в углекислом газе; ААрДС — автоматическая аргодуговая сварка; АДИС — аргодуговая импульсная сварка.

свойства соединений и может с успехом применяться для конструкций, работающих при статических нагрузках.

При сварке с помощью солнечной энергии важно с достаточной точностью определять температуру в зоне сварки. Сложность расчетов связана с необходимостью применять теплопроводящие, достаточно жесткие подкладки из латуни [3]. Рассмотрим задачу нагрева нормально-распределенным источником постоянной мощности неподвижной пластины толщиной  $l$ , находящейся на теплопроводящей бесконечной подкладке, с учетом температурной зависимости объемной теплоемкости и коэффициентов теплопроводности пластины и подкладки, предполагаемая контакт между ними неидеальным.

Математическая формулировка задачи имеет вид [6]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda_i(T_i) r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial z} \right] = C_{v_i} \frac{\partial T_i}{\partial t}$$

$$t > 0, \quad i = 1; 2, \quad T_1 \text{ для } r \geq 0, \quad l \geq z \geq 0; \\ T_2 \text{ для } r \geq 0, \quad l \leq z < \infty; \quad (1)$$

$$-\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_{2m} e^{-kr^2}; \quad \lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=l} = \\ = \lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=l}; \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=l} = \alpha (T_1 - T_2) \Big|_{z=l};$$

$$T_1(r, z, 0) = T_2(r, z, 0) = T_1(\infty, z, t) = \\ = T_2(\infty, z, t) = T_2(r, \infty, t) = 0.$$

Здесь  $T_i$  — температура пластины ( $i=1$ ) и подкладки ( $i=2$ );  $\lambda_i(T_i)$  — коэффициент теплопроводности;  $C_{v_i}(T_i)$  — объемная теплоемкость;  $q_{2m}$  — максимальная плотность падающего потока излучения;  $k$  — коэффициент сосредоточенности;  $\alpha$  — величина, обратная термическому сопротивлению контакта.

Зависимости  $\lambda_i(T_i)$  и  $C_{v_i}(T_i)$  для различных металлов имеют соответствующий вид и для решения задачи были выбраны в виде

$$\lambda_1(T_1) = \lambda_{10} + \beta_1 T_1; \quad C_{v_1}(T_1) = C_{v_{10}} + \delta_1 T_1;$$

$$\lambda_2(T_2) = \lambda_{20} + \beta_2 T_2; \quad C_{v_2}(T_2) = (\gamma_2 T_2^2 + \delta_2 T_2 + \kappa)^{-1}. \quad (2)$$

Для решения системы (1) ввели следующую замену переменных:

$$T_i = \frac{q_{2m} u_i}{\lambda_{i0} \sqrt{k}}; \quad r = \rho k^{-1/2}; \quad z = \xi k^{-1/2}; \quad h_i = \frac{q_{2m} \beta_i}{\lambda_{i0}^2 \sqrt{k}};$$

$$t = \frac{\tau}{k a_{i0}}; \quad g_1 = \frac{q_{2m} \delta_1}{\lambda_{10} \sqrt{k} C_{v_{10}}}; \quad (3)$$

$$g_2 = \frac{q_{2m} \delta_2}{\lambda_{20} \sqrt{k} \kappa}; \quad m_2 = \frac{q_{2m}^2 \gamma_2}{\lambda_{20}^2 k \kappa}.$$

Здесь  $a_{i0} = \lambda_{i0} C_{v_{i0}}^{-1}$  — коэффициент температуропроводности, причем  $C_{v_{20}} = \kappa^{-1}$ .

После подстановки уравнений (3) в уравнения (1) и применения преобразования Кирхгофа [6]

$$v_i = \int_0^{u_i} (1 + h_i x) dx = u_i + \frac{h_i}{2} u_i^2 \quad (4)$$

получим в первом приближении линеаризованную систему, которую можно решить, применив прямые и обратные преобразования Лапласа по  $\tau$  и Ханкеля по  $\rho$ . Решение для функции  $v_1(\rho, \xi, \tau)$  имеет вид

$$v_1(\rho, \xi, \tau) = \frac{1}{2} \int_0^\infty s e^{-s^2 l^2} J_0(\rho s) \times \\ \times \left\{ \frac{\text{sh}[s(l\sqrt{k} - \xi)] \frac{\alpha \varepsilon'_1}{\lambda_{10} \sqrt{k}} + \text{ch}[s(l\sqrt{k} - \xi)] \times}{\text{sh}(s l \sqrt{k}) \left( s + \frac{\alpha \varepsilon'_2}{\lambda_{20} \sqrt{k}} \right) +} \right. \\ \times \left( s + \frac{\alpha \varepsilon'_2}{\lambda_{20} k^{1/2}} \right) - \frac{s(l\sqrt{k} - \xi) \frac{\alpha \varepsilon'_1}{\lambda_{10} \sqrt{k}} +}{\text{ch}(s l \sqrt{k}) \frac{\alpha \varepsilon'_1}{\lambda_{10} k^{1/2}} - s^2 \left[ l\sqrt{k} \left( 1 + \frac{\alpha \varepsilon'_2}{\lambda_{20} \sqrt{k}} \right) \times} \right.} \\ \left. \left. + s \left( 1 + \frac{\alpha \varepsilon'_2}{\lambda_{20} \sqrt{k}} \frac{1}{s \sqrt{1 - \omega'_2/\omega'_1}} \right) \right] \right\} \times \\ \times \left. \left. \frac{1}{s \sqrt{1 - \omega'_2/\omega'_1}} \right) + \frac{l^2 k}{2} \frac{\alpha \varepsilon'_1}{\lambda_{10} \sqrt{k}} \right] - \frac{\alpha \varepsilon'_1}{\lambda_{10} \sqrt{k}} \times e^{-\frac{s^2 \tau}{\omega'_1}} \Bigg\} ds. \quad (5)$$

Здесь  $J_0(\rho s)$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $\omega'_1$  — среднее значение функции  $\omega_i(v_i)$ ;  $\varepsilon_i$  — среднее значение коэффициента  $\varepsilon_i$ , определяемого из выражения

$$\sqrt{1 + 2 h_1 v_1} = 1 + \varepsilon_i h_1 v_i. \quad (6)$$

В уравнении (5) первый член суммы определяет установившуюся температуру при  $\tau \rightarrow \infty$ , а второе слагаемое учитывает изменение температуры в период теплонасыщения.

Расчет по уравнению (5) проводили для нагрева солнечным излучением пластин из стали 12Х18Н10Т на латунной подкладке. При этом подсчитывали установившуюся температуру, т. е. вычисляли значение только первого члена уравнения (5). Расчет проводили для трех источников нагрева: солнечной печи УСП-3,0 с концентратором диаметром 3,0 м (слежение через гелиостат), коэффициентом сосредоточенности  $k=1,1 \text{ см}^{-2}$  и максимальной плотностью потока энергии  $q_{2m}=1,1 \text{ кВт/см}^2$  при толщине пластин  $l=0,3 \text{ см}$ ; солнечной печи УСП-1,5 с концентратором диаметром 1,5 м (слежение через гелиостат),  $k=4,35 \text{ см}^{-2}$ ,  $q_{2m}=1,1 \text{ кВт/см}^2$ ,  $l=0,3 \text{ см}$ ; установки «Солнце» с диаметром концентратора 0,5 м (непосредственное слежение),  $k=67,7 \text{ см}^{-2}$ ,  $q_{2m}=2,3 \text{ кВт/см}^2$ ,  $l=0,12 \text{ см}$ .

Аппроксимированные аналитические зависимости  $\lambda_i(T_i)$  и  $C_{v_i}(T_i)$  имеют вид

$$\lambda_1(T_1) = 0,14 + 0,14 \cdot 10^{-3} T, \quad \text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} (\text{°C})^{-1};$$

$$\lambda_2(T_2) = 1,05 + 0,16 \cdot 10^{-2} T, \quad \text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} (\text{°C})^{-1};$$

$$C_{v_1}(T_1) = 3,70 + 0,75 \cdot 10^{-3} T, \quad \text{Дж} \cdot \text{см}^{-3} (\text{°C})^{-1};$$

$$C_{v_2}(T_2) = (1,75 \cdot 10^{-6} T^2 - 1,50 \cdot 10^{-3} T + 0,50),$$

$$\text{Дж} \cdot \text{см}^{-3} (\text{°C})^{-1}.$$

Таблица 2

Металл	Толщина, мм	Вид сварки	Предел прочности, МПа	Угол изгиба, град
12Х18Н10Т	1,5—2,0	СКСИЗГ	570	180
	1,0	СКСИВ	627	
	1,0	РДСПЭ	590	
	1,0	АСФ	605	
	1,0	АСУГ	601	
	1,5—2,0	РАрДС	570	
	1,5—2,0	ЭШС	587	
	5,0—6,0	ЛС	630	
ОТ4	1,0	СКСИВ	645	149
	1,5	СКСИВ	402	160
	1,5	РАрДС	792	100
	1,5	ААрДС	825	88
	2,0	ААрДС	780	95
	2,0	ЭШС	680	95

Примечание. СКСИЗГ — сварка концентрированным солнечным излучением в защитном газе (аргон); СКСИВ — сварка концентрированным солнечным излучением в вакууме; РДСПЭ — ручная дуговая сварка покрытыми электродами; АСФ — автоматическая сварка под флюсом; ЭШС — электрошлаковая сварка; ЛС — лазерная сварка.

Величину  $\alpha$ , обратную термическому сопротивлению контакта, вычисляли согласно работе [7].

Результаты расчетов температуры  $T_1$  в зависимости от расстояния  $r$  представлены на рис. 2, где кривые 1 и 2 построены для солнечных печей УСП-3,0 и УСП-1,5, кривая 3 — для установки «Солнце». На этом же рисунке нанесены соответствующие экспериментальные точки, полученные с помощью платино-платинородиевых и хромель-алюмелевых термопар. Показания термопар записывали на многоточечном потенциометре. Сходимость расчетных данных с экспериментальными удовлетворительная. Некоторый разброс отдельных точек можно объяснить тем, что эксперименты проводили при различных уровнях падающей солнечной радиации, т. е. при разных зна-

чениях максимальной плотности потока энергии в пятне, в то время как расчет проводили для одного указанного значения  $q_{2m}$ . Кроме того, при использовании подкладки возможен разброс данных из-за разного прижатия пластин к поверхности подкладки на различных участках.

Таким образом, выражение (5) можно с достаточной степенью точности применять для расчета температуры в нагреваемых концентрированным солнечным излучением неподвижных пластинах из стали 12Х18Н10Т на массивной латунной подкладке на любом расстоянии вплоть до центра пятна нагрева, а также и для других металлов, у которых зависимости  $\lambda(T)$  и  $C_p(T)$  аналогичны зависимостям (2).

#### Список литературы

1. Рыкалин Н. Н. Источники энергии для сварки. — Сварочное производство, 1974, № 11, с. 52.
2. Ахмедов А. Р., Смольский Г. В. и др. Сварка нержавеющей стали Х18Н10Т с помощью концентрированной солнечной энергии. Сборник материалов II Среднеазиатской конференции по сварке. Ташкент, 1973.
3. Применение концентрированной солнечной энергии для сварки металлов / Ахмедов А. Р., Афанасьев И. В., Смольский Г. В. и др. — Сварочное производство, 1974, № 2, с. 12—14.
4. Ахмедов А. Р., Смольский Г. В. Инженерный метод расчета температурного поля плоского неподвижного приемника, помещенного в фокус параболического концентратора. — Гелiotехника, 1976, № 4.
5. Углов А. А., Ахмедов А. Р., Смольский Г. В. Энергетические условия сварки солнечным излучением. — Сварочное производство, 1976, № 9, с. 1—2.
6. Углов А. А., Смольский Г. В. Расчет нагрева тонких пластин на теплопроводящей подкладке нормально-распределенным источником с учетом температурной зависимости теплофизических коэффициентов. — Физика и химия обработки материалов, 1981, № 2.
7. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975.