

УДК 621.791.14:62-97

Р.Р. КОТЛЫШЕВ, К.Г. ШУЧЕВ, А.В. КРАМСКОЙ

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Составлен тепловой баланс энергии и предложена аналитическая модель расчета температуры при сварке трением с перемешиванием. Установлено, что температура на поверхности составляет 440 °С, а измеренная на глубине 2 мм от поверхности — 480 °С.

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, источник энергии, расчет температуры, измерение температуры.

**Введение.** Тепловые процессы при сварке играют ведущую роль в образовании сварного соединения, а также влияют на прочностные характеристики сварного соединения. При сварке в твердой фазе температура в зоне сварки и ее распределение по основному металлу оказывает действие на скорость и характер диффузионных, релаксационных процессов и др. Сварка трением с перемешиванием (СТП) относится к способам сварки в твердой фазе, поэтому важно знать температурные режимы. На данном этапе в большинстве публикаций предлагаются численные методы [1—4] (метод конечных элементов) расчета температуры и температурных полей при СТП. Интерес представляет аналитический расчет температуры при СТП. Большой вклад в исследование тепловых процессов при технологических процессах внесли Н.Н. Рыкалин, А.Н. Резников и др. [6, 9]

**Тепловой баланс.** Чтобы управлять тепловыми процессами при сварке, необходимо знать, где возникает, как распространяется температура и как происходит теплообмен. Схема распределения тепловой энергии при СТП показана на рис. 1.

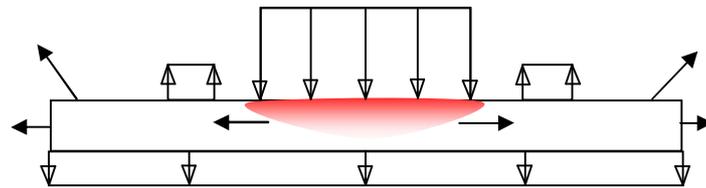


Рис. 1. Распределение тепловой энергии от источника тепловой мощности:

$q_k$  — потери на конвективный теплообмен;  $q_0$  — отвод тепла в сборочно-сварочную оснастку;  $q_1$  — отвод тепла в деталь;  $q_2$  — вводимая тепловая мощность;  $q_n$  — отвод тепла в подкладку

Основными источниками теплоты являются работа трения на контактных поверхностях инструмента и изделия, а также энергия деформации свариваемого металла. Источники нагрева при СТП требуют дополнительного исследования. В данной работе принята упрощенная схема СТП. Инструмент для сварки рассматривается как цилиндр с плоским торцом, которым он трется о свариваемые детали, выполненные из алюминиевого сплава АД31Т (подобную схему см. в работе [5]).

Основным источником стока тепла является его отвод в детали за счет высокой теплопроводности алюминия. Остальными источниками — подкладка и прижимы сборочно-сварочной оснастки, а также конвективный теплообмен с окружающей средой. В инженерных расчетах теплообменом с окружающей средой обычно пренебрегают.

На основании вышеизложенного составлено уравнение теплового баланса при СТП (без учета отвода в подкладку):

$$\tilde{\gamma} \frac{\partial T}{\partial t} = A - \lambda_s \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \beta(T - T_0), \quad (1)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость алюминия, Дж/(кг·К);  $\gamma$  — плотность алюминия, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  — температура в точке, °С;  $t$  — время, с;  $A$  — объемная интенсивность выделения теплоты от трения, Вт/м<sup>3</sup>;  $\lambda_s$  — теплопроводность алюминия, Вт/(м·К);  $x, y$  — координаты точки, м;  $\beta$  — коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $T_0$  — температура окружающей среды, °С.

**Источник энергии при СТП.** Общая тепловая мощность при СТП возникает вследствие преобразования в теплоту работы внешних сил трения в месте контакта инструмента и свариваемой детали, т. е. механической работы. Между механической мощностью и тепловой теоретически нет полной количественной идентичности, так как часть механической энергии переходит в поглощенную энергию деформации кристаллической решетки. Принято считать, что вся механическая энергия переходит в тепловую [6]. При СТП тепловая мощность определяется зависимостью:

$$q_2 = \frac{4M_{\text{тр}}\omega}{\pi D^2}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{тр}}$  — крутящий момент сил трения, Н·м;  $\omega$  — угловая скорость вращения инструмента, с<sup>-1</sup>;  $D$  — диаметр инструмента, м.

Чтобы узнать мощность, вводимую в сварное соединение, необходимо измерить момент силы трения. Для этого была спроектирована установка и проведены измерения для полосы толщиной 4 мм из сплава АД31Т. Пиковые значения момента составили 32 Н·м, в то время как при установившемся процессе значение момента составляло в среднем 18 Н·м при диаметре инструмента 25 мм, частоте вращения инструмента 710 мин<sup>-1</sup>, величине заглубления 0,4 мм (осевое усилие: пиковое 3,9 кН, при установившемся процессе 2,7 кН). Измерение проводили без движения инструмента. Однако в процессе сварки инструмент движется и таким образом постоянно вовлекает в пластическую деформацию более холодный металл, поэтому для расчета температуры правильнее брать пиковые значения момента.

В этом случае среднее значение вводимой тепловой мощности, согласно формуле (2), составило 2,4 кВт (или 4 800 кВт/м<sup>2</sup>).

Распределение тепловой мощности по контакту инструмента с заготовкой при классической сварке трением имеет параболический вид [7] (рис. 2, а). Связано это с неравномерным распределением линейной скорости и, как следствие, крутящего момента.

Вероятно, такая же зависимость характерна и для начала процесса СТП (см. рис. 2, а), т. е. в момент первоначального заглубления инструмента. Но при установившемся процессе источник тепловыделения можно (для инженерных расчетов) считать равномерно распределенным по ряду причин (рис. 2, б):

- несмотря на то, что энергия распределяется крайне неравномерно (см. рис. 2, а), и, кроме того, источник движущийся, будет наблюдаться выравнивание тепловыделения;
- при СТП металл находится в активированном состоянии, происходит интенсивный макромассоперенос, что в сочетании с большой теплопроводностью алюминия должно приводить к быстрому выравниванию температуры на поверхности свариваемых деталей.

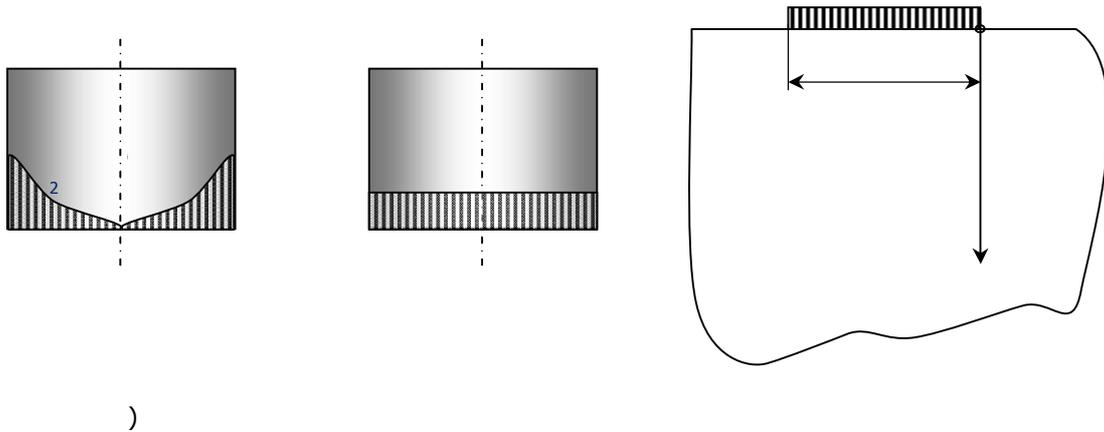


Рис. 2. Переход к расчетной схеме температуры при СТП:

*a* — распределение тепломощности в начальный момент времени; *б* — распределение тепломощности при установившемся процессе; *в* — определение максимальной температуры при СТП

**Температурный расчет.** Для аналитического расчета были приняты следующие допущения:

- источник поверхностный равномерно распределенный импульсный неподвижный с временем действия импульса, равным отношению диаметра инструмента к скорости сварки;
- тело рассматривается как полубесконечное, чтобы не учитывать теплоотвод в подкладку;
- распределение тепла и температуры происходит по направлению нормали к поверхности (температурное поле одномерное).

Схема для расчета температуры при СТП показана на рис. 2, *в*.

Для температурного расчета были взяты средние значения теплофизических свойств технического алюминия в интервале температур от 20 °С до температуры плавления алюминия (см. таблицу) [8]. Считаем, что теплофизические свойства при изменении температуры остаются постоянными.

Теплофизические свойства алюминия для расчета

Физическая величина	Значение
Плотность $\gamma$	2627,5 кг/м <sup>3</sup>
Теплопроводность $\lambda_s$	225,5 Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость $c$	1076,4375 Дж/(кг·К)
Температуропроводность $a$	$8,11 \cdot 10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с

Источнику теплоты при СТП нет аналога среди сварочных источников [9]. Сам процесс сходен с фрезерованием или шлифованием. Поэтому для расчета температуры воспользуемся формулами, применяемыми для расчета температуры при механической обработке металлов. С учетом принятых допущений температуру можно вычислить по следующей формуле [10]:

$$T(z,t) = \frac{2q_2\sqrt{t}}{\sqrt{\lambda_s c \gamma}} \operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{at}} + T_0, \quad (3)$$

$$T(z,t) = \frac{2q_2\sqrt{at}}{\lambda_s} \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{z^2}{4at}} - \frac{z}{2\sqrt{at}} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{at}} \right) + T_0, \quad (4)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x). \quad (5)$$

Функцию  $\operatorname{erf}(x)$  для инженерных расчетов представляют как [6]

$$\operatorname{erf}(x) = \sqrt{1 - e^{-1,26x^2}}. \quad (6)$$

Для расчета максимальной температуры (на поверхности) формула приобретает вид:

$$T_{\max}(0, t) = \frac{2q_2\sqrt{at}}{\sqrt{\pi\lambda_s}} + T_0. \quad (7)$$

Далее был проведен расчет температуры по формуле (4) в комплексе MS Excel. Полученные значения представлены на рис. 3. Таким образом, температура на поверхности (при  $z = 0$ ) достигает 442 °С, на глубине 2 мм — 400 °С, а на глубине 4 мм — 361 °С.

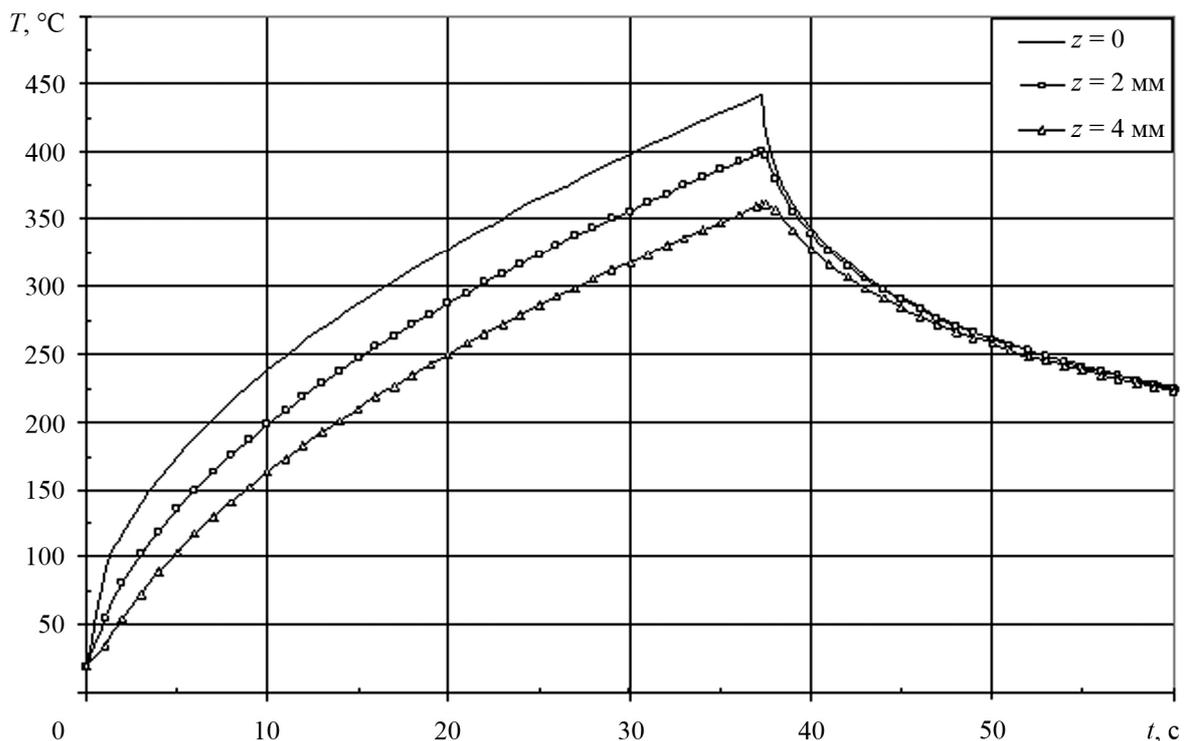


Рис. 3. Температура при нагревании

Естественно, данный расчет дает приближенное значение температуры, особенно на некоторой глубине, так как не учитывается теплоотвод в подкладку.

**Измерение температур.** Для подтверждения расчетов была измерена температура алюминиевого сплава АД31Т при движении по поверхности цилиндрического инструмента с плоским торцом диаметром 25 мм. Температуру измеряли методом термопар с использованием тензометрической станции А17-Т8, ПК и программного обеспечения ZETLab. Термопара представляла собой хромель-алюмелевую проволоку диаметром 0,5 мм. Эксперимент повторяли трижды. На основании этого были получены средние значения температур. Термопару укладывали в стык на глубине 2 мм от поверхности, после чего обжимали свариваемыми деталями.

Максимальная температура составила 480 °С. Типовой график изменения температуры при СТП представлен на рис. 4.



Рис. 4. Изменение температуры в стыке сварного соединения

**Выводы.** Составлен баланс тепловой энергии при СТП. Показано, что основным источником энергии является механическая работа внешних сил трения.

Предложена модель для аналитического расчета максимальной температуры при СТП, которая дает удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными в пределах 16-17 %.

### Библиографический список

1. Modelling the Friction Stir Welding of Aerospace Alloys / P.A. Colegrove, H.R. Shercliff: 5th Intern. Friction Stir Welding Symp. 14—16 Sept. – Metz, France, 2004. — p. 21.
2. Influence of friction stir welding parameters on the power input and temperature distribution in aluminium alloys / A. Simar, T. Pardoen, B. de Meester [et al.] : Ibid. — p. 16.
3. Thermomechanical and microstructural modelling of the Friction stir Welding Process / Ch. Desrayaud, P. Heurtier, D. Alléhaux [et al.] : Ibid. — p. 11.
4. Inverse Analysis using a Genetic Algorithm for the Finite Element Modelling of Friction Stir Welding / T. De Vuyst, L. D’Alvise, A. Simar [et al.] : Ibid. — p. 16.
5. Расчетно-экспериментальная методика определения деформационных свойств алюминиевых сплавов при фрикционной сварке / В.А. Ерофеев [и др.] // Сварка и диагностика. — 2009. — № 2. — С. 6—10.
6. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах : учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты». — М. : Машиностроение, 1990. — 288 с.
7. Вилль В.И. Сварка металлов трением. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1970. — 176 с.
8. Теплотехнический справочник / под общ. ред. В.Н. Юренева. — В 2 т. — М. : Энергия, 1975. — 750 с.

9. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М. : Mashgiz, 1951. — 296 с.
10. Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Бруквицкий Я. О самоорганизации системы резания в условиях электроконтактного подогрева. — Ч. 1 // Безызносность : Межвуз. сб. науч. ст. — Ростов н/Д, 1998. — Вып. 5. — С. 157—178.

## References

1. Modelling the Friction Stir Welding of Aerospace Alloys / P.A. Colegrove, H.R. Shercliff: 5th Intern. Friction Stir Welding Symp. 14—16 Sept. — Metz, France, 2004. — p. 21.
2. Influence of friction stir welding parameters on the power input and temperature distribution in aluminium alloys / A. Simar, T. Pardoen, B. de Meester [et al.] : Ibid. — p. 16.
3. Thermomechanical and microstructural modelling of the Friction stir Welding Process / Ch. Desrayaud, P. Heurtier, D. Allihaux [et al.] : Ibid. — p. 11.
4. Inverse Analysis using a Genetic Algorithm for the Finite Element Modelling of Friction Stir Welding / T. De Vuyst, L. D'Alvise, A. Simar [et al.] : Ibid. — p. 16.
5. Raschetno-eksperimental'naya metodika opredeleniya deformatsionnykh svoystv alyuminievykh splavov pri frikcionnoi svarke / V.A. Erofeev [i dr.] // Svarka i diagnostika. — 2009. — № 2. — S. 6—10. — in Russian.
6. Reznikov A.N., Reznikov L.A. Teplovye processy v tehnologicheskikh sistemah : uchebnyk dlya vuzov po special'nostyam «Tehnologiya mashinostroeniya» i «Metallorjesushchie stanki i instrumenty». — М. : Mashinostroenie, 1990. — 288 s. — in Russian.
7. Vill' V.I. Svarka metallov treniem. — L. : Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1970. — 176 s. — in Russian.
8. Teplotekhnicheskii spravochnik / pod obsch. red. V.N. Yureneva. — V 2 t. — М. : Energiya, 1975. — 750 s. — in Russian.
9. Rykalin N.N. Raschety teplovykh processov pri svarke. — М. : Mashgiz, 1951. — 296 s. — in Russian.
10. Ryjkin A.A., Shuchev K.G., Brukvickii Ya. O samoorganizatsii sistemy rezaniya v usloviyah elektrokontaktnogo podogreva. — Ch. 1 // Bezyznosnost' : Mezhvuz. sb. науч. st. — Ростов н/Д, 1998. — Вып. 5. — С. 157—178. — in Russian.

Материал поступил в редакцию 15.06.10.

**R.R. KOTLYSHEV, K.G. SHUCHEV, A.V. KRAMSKOY**

## TEMPERATURE CALCULATIONS IN FRICTION STIR WELDING WITH ALUMINIUM ALLOYS

*Energy heat balance is calculated, and an analytical model of temperature calculations in friction stir welding is offered. Calculations show that the surface temperature makes 440 °C, and the temperature at depth of 2 mm from the surface makes 480 °C.*

**Key words:** *friction stir welding, energy source, temperature calculations, thermometry.*

**КОТЛЫШЕВ Роман Рефатович** (р. 1983), аспирант кафедры «Машины и автоматизация сварочных процессов» Донского государственного технического университета, магистр техники и технологии (2006). Окончил ДГТУ (2006).

Область научных интересов — сварка трением с перемешиванием, сварка алюминия, прочность сварных конструкций.

Автор 8 научных работ.

kotlyshev@mail.ru

**ШУЧЕВ Константин Григорьевич** (р. 1953), профессор кафедры «Инструментальное производство» Донского государственного технического университета (2008), кандидат технических наук (1984). Окончил Ростовский институт сельскохозяйственного машиностроения (1975).

Область научных интересов — трибология, теплофизика технологических систем, резание материалов.

Автор более 70 научных работ.

**КРАМСКОЙ Александр Владимирович** (р. 1986), магистрант кафедры «Машины и автоматизация сварочных процессов» Донского государственного технического университета, бакалавр техники и технологии (2009). Окончил ДГТУ (2010).

Область научных интересов — сварка трением с перемешиванием.

**Roman R. Kotlyshev** (1983), Postgraduate student of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University. Master of Science in Methods and Technology (2006). He graduated from Don State Technical University (2006).

Research interests — friction stir welding, aluminum welding, strength of welding construction.

Author of 8 scientific publications.

kotlyshev@mail.ru

**Konstantin G. Shuchev** (1953), Professor of the Tool Production Department, Don State Technical University (2008). Candidate of Science in Engineering (1984). He graduated from Rostov Institute of Agricultural Engineering (1975).

Research interests — tribology, thermal process systems, material cutting technology.

Author of more than 70 scientific publications.

**Alexander V. Kramskoy** (1986), Undergraduate of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University. Bachelor of Science in Methods and Technology (2009).

Research interests — friction stir welding.