

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ПРИ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ

© 2012 А.Ю. Медведев, Р.В. Никифоров, А.В. Супов

Уфимский государственный авиационный технический университет

Поступила в редакцию 23.03.2012

Статья посвящена моделированию температурного поля в процессе линейной сварки трением. Предложенная методика позволяет оценить долю тепловой энергии, отводимой в грат, и получить одномерное распределение температуры в зоне сварки, используя теорию тепловых процессов Н.Н. Рыкалина.

Ключевые слова: *линейная сварка трением, моделирование, температурное поле, одномерная теплопроводность, сплавы титана*

В последние десятилетия большое внимание ведущих зарубежных и отечественных авиационных предприятий обращено к таким разновидностям сварки трением как сварка вращающимся инструментом – *friction stir welding*, и линейная сварка трением – *linear friction welding*. Линейная сварка трением (ЛСТ) применяется для приварки лопаток к дискам при изготовлении сварных моноколес и отличается от традиционной сварки трением тем, что детали совершают возвратно-поступательное движение друг относительно друга. При ЛСТ подвод необходимой для формирования сварного соединения энергии в зону сварки осуществляется механическим путем. Энергопотери складываются из отвода тепла внутрь свариваемых деталей за счет механизма теплопроводности, потерь тепла с боковой поверхности деталей за счет излучения и конвекции, а также уноса энергии с металлом, выдавливаемым в грат. С учетом перечисленных составляющих, уравнение баланса мощности в зоне формирующегося соединения имеет вид:

$$P_{inp} + P'_{inp} = P_{out}^{\lambda} + P_{out}^{vol} + P_{out}^{surf} \quad (1)$$

где P_{inp} – механическая мощность, вводимая приводом осцилляции; P'_{inp} – механическая мощность, вводимая приводом осадки; P_{out}^{λ} – тепловая мощность, отводимая в свариваемые детали; P_{out}^{vol} – тепловая мощность, отводимая в грат, с выдавленным металлом; P_{out}^{surf} – тепловая мощность, отводимая с боковых поверхностей деталей излучением и конвекцией.

В представленной работе была предпринята попытка оценить составляющие, входящие

в (1), используя данные, записанные в процессе сварки. Из циклограммы процесса сварки, приведенной на рис.1, видно, что при соизмеримых усилиях перемещения привода осадки малы по сравнению с перемещениями привода осцилляции, соответственно P_{inp} пренебрежимо мало по сравнению с P'_{inp} . Энергопотери с боковой поверхности также малы по сравнению с остальными составляющими уравнения (1). Без учета P_{inp} и P_{out}^{surf} уравнение (1) принимает вид:

$$P_{inp} = P_{out}^{\lambda} + P_{out}^{vol} \quad (2)$$

Составляющую баланса, учитывающую потери тепла с гратом, можно оценить, зная скорость осадки и температуру выдавливаемого металла:

$$P_{out}^{vol} = \dot{z} \times A \times c\rho \times (T_{MEAN} - T_0) \quad (3)$$

где \dot{z} – скорость осадки (зависимость укорочения образцов от времени регистрируется датчиками машины), мм/с; A – поперечное сечение свариваемых образцов, мм²; $c\rho$ – средняя объемная теплоемкость, Дж/(м³×К); T_{MEAN} – средняя температура выдавливаемого в грат металла, К; T_0 – начальная температура, К.

Генерируемая в стыке деталей приводом осцилляции машины тепловая мощность может быть найдена из соотношения:

$$P_{inp} = F_t \times \dot{x} \quad (4)$$

где \dot{x} – скорость перемещения штока гидроцилиндра осцилляции, регистрируемая датчиками установки, мм/с; F_t – усилие сопротивления сдвигу в плоскости стыка, Н.

Усилие сопротивления сдвигу в плоскости стыка может быть найдено из второго закона Ньютона:

$$F_t = F_X - m\ddot{x} \quad (5)$$

Медведев Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварочного производства». E-mail: medvedevalexandr@inbox.ru

Никифоров Роман Валентинович, аспирант. E-mail: roman.nikiforov.svarka@mail.ru

Супов Андрей Владимирович, инженер. E-mail: supov87@mail.ru

где \ddot{x} – ускорение штока гидроцилиндра осциллиции, регистрируемое датчиками установки, м/с^2 ; m – масса колеблющихся частей установки, кг; F_x – усилие на штоке гидроцилиндра, регистрируемое датчиками установки, Н.

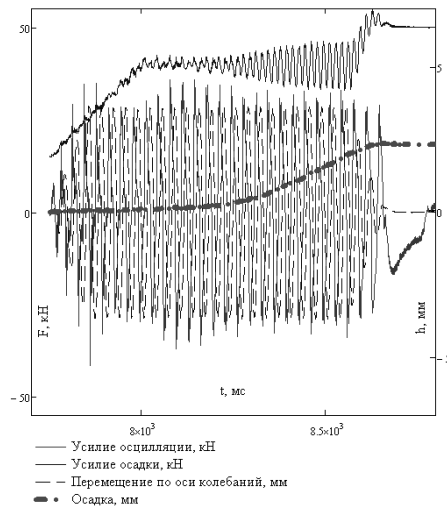


Рис. 1. Пример циклограммы ЛСТ деталей из титанового сплава

Все составляющие баланса мощности входящие в (2)-(5) могут быть вычислены при наличии циклограмм процесса ЛСТ и заданном значении T_{MEAN} . Поскольку значения всех параметров, определяющих величину тепловой мощности, меняются по законам, близким к синусоидальным, величина вводимой мощности усреднялась за период колебаний при сварке. Определенные расчетом составляющих баланса мощности приведены на рис. 2. Полученные результаты соответствуют сварке сплава ВТ6 со с усилием осадки $F_z=35$ кН, амплитудой колебаний $a=2$ мм, частотой колебаний $f=50$ Гц и величиной осадки $h=4$ мм, значение T_{MEAN} принималось равным 1350 К. Как видно из приведенных зависимостей вводимая мощность нелинейно возрастает в начальный период сварки, достигает максимума и незначительно снижается, после чего остается постоянной до окончания сварки, устанавливается равновесие между подводимой и отводимой мощностью. В ранних публикациях, посвященных ЛСТ [1, 2], также отмечалось, что через некоторое время после начала ЛСТ процесс приходит к равновесному состоянию. Следует подчеркнуть, что принятое для расчета значение T_{MEAN} заранее не известно, и может изменяться на различных стадиях процесса. В предложенной методике расчета средняя температура металла, выдавливаемого в грат, фактически является начальным приближением, она считается неизменной в ходе всего процесса сварки, и подлежит итерационному уточнению.

Величина тепловой мощности, отводимой в стык P_{out}^{λ} , полученная в результате расчета, определяет интенсивность нагрева стыка и может быть использована для расчета поля температур при сварке. Нами была принята имеющаяся в [3] схема нагрева стержня плоским источником тепла. При

этом источнику мощностью P_{out}^{λ} задается движение со скоростью \dot{z} , расчетные формулы и сам расчет подробно описаны в [4].

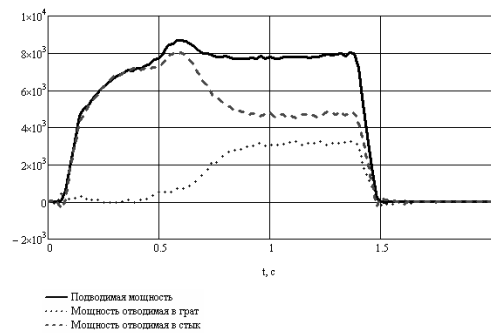


Рис. 2. Изменение составляющих баланса мощности в уравнении (2) за цикл сварки

При известных расчетном распределении температур $T(z,t)$, и ширине сварного шва s можно оценить правильность выбора величины T_{MEAN} . Для этого необходимо сравнить величину P_{out}^{vol} на стадии установившейся осадки с рассчитанным значением тепловой мощности, отводимой в грат:

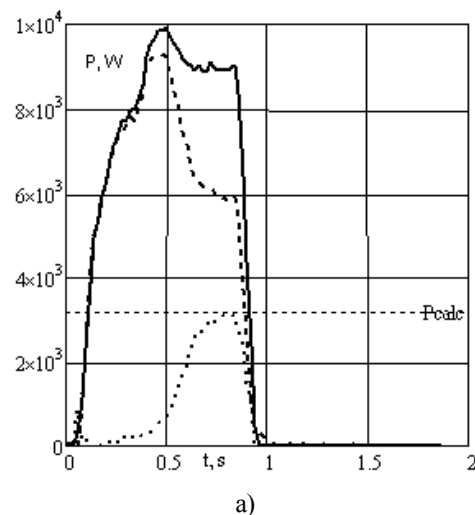
$$P_{CALC} = \frac{s}{\dot{z}} \times F \times c\rho \int_0^{s/2} (T - T_0) dz,$$

где s – ширина сварного шва, мм.

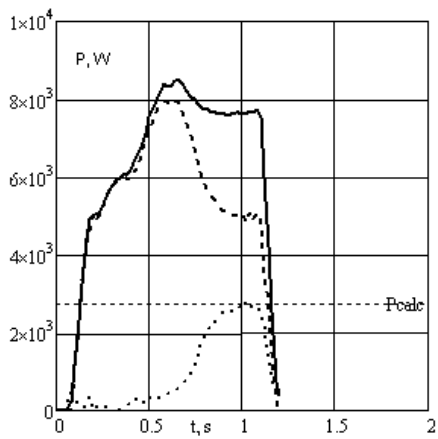
Предложенная методика была использована для расчета температурного поля для сварок с тремя различными сочетаниями параметров режима (см. табл.). Кривые изменения составляющих баланса мощности, построенные для исследованных сочетаний параметров, представлены на рис. 3. Величина P_{CALC} обозначена на графиках пунктирной линией. Результаты расчета поля температур при сварке представлены на рис. 4, 5.

Таблица 1. Параметры режимов сварки

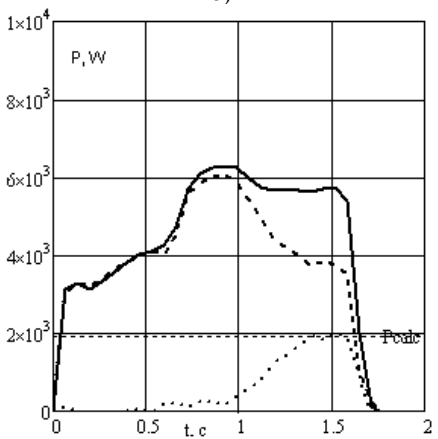
Режим	a , мм	f , Гц	F_z , кН	h , мм	s , мм	T_{MEAN} , К
режим (а)	2,3	50	40	2	0,62	1300
режим (б)	2,0	50	35	2	0,65	1350
режим (в)	2,5	30	25	2	0,68	1350



а)

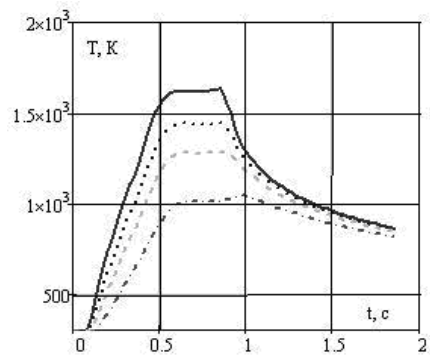


б)

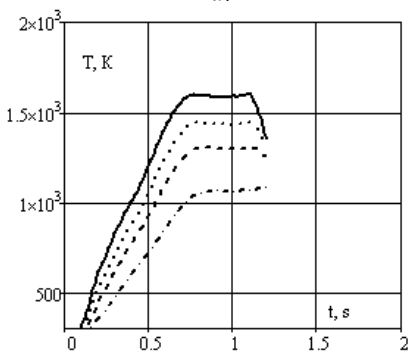


в)

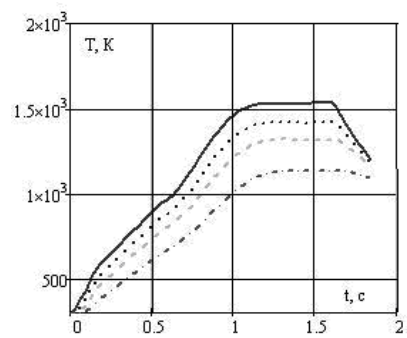
Рис. 3. Изменение составляющих баланса мощности в уравнении (2) за цикл сварки при различных сочетаниях параметров режима: — подводимая мощность; мощность, отводимая в грат, ----- мощность, отводимая в стык



а)

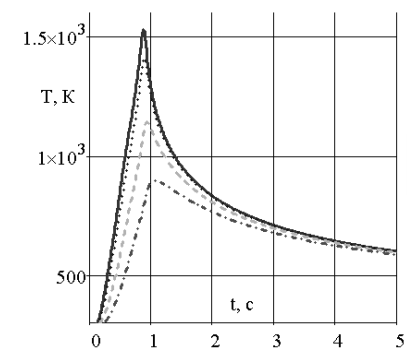


б)

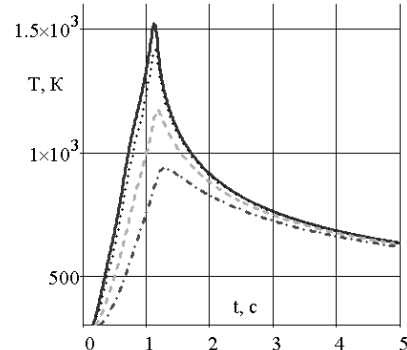


в)

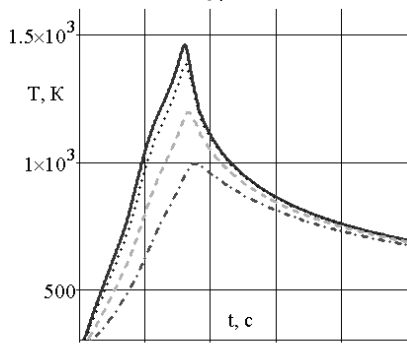
Рис. 4. Изменение расчетной температуры сечений, удаленных на различное расстояние от плоскости стыка для сварок с различными значениями параметров режима: — плоскость стыка; 0,25 мм от плоскости стыка; ----- 0,5 мм от плоскости стыка; -.-.-. 1,0 мм от плоскости стыка



а)



б)



в)

Рис. 1. Термические циклы сечений, расположенных на различном расстоянии от стыка: — положение стыка после сварки стыка; 0,2 мм от плоскости стыка; ----- 0,75 мм от плоскости стыка; -.-.-. 1,5 мм от плоскости стыка

Режим (а) и (в) соответствуют крайним значениям F_Z и $a \times f$ из исследованного диапазона. Максимальные значения F_Z и $a \times f$ соответствуют «жестким» режимам, а минимальные – «мягким». Как видно из рис. 3 увеличение F_Z и $a \times f$ приводит к увеличению вводимой мощности и снижению времени сварки. Как видно из представленных на рис. 3 кривых изменение температуры при ЛСТ вполне соответствует принятому в теории тепловых процессов сварки разделению всего периода нагрева на стадии теплонасыщения, квазистационарного поля и выравнивания температур.

Следует отметить, что случае (а) при более низком значении средней температуры T_{MEAN} температура в плоскости стыка оказалась выше. Это может быть связано с более высокими градиентами температуры при сварке на «жестких» режимах и допущениями, принятыми в расчете. На начальной стадии процесса ЛСТ тепловыделение обусловлено преимущественно трением в стыке, и приближение плоского источника тепла вполне соответствует реальным условиям. На стадии установившейся осадки, по всей видимости, преобладающим механизмом становится диссипация механической энергии при пластическом деформировании, тепло при этом выделяется по всему объему, вовлеченному в вязкопластическое течение. Принятая нами схема сосредоточенного источника взамен распределенного, очевидно, дает завышенные значения температуры в свариваемом стыке, и при оценке температурного состояния в зоне сварного шва предпочтительно пользоваться средним значением температуры T_{MEAN} .

Выводы:

1. Предложенная методика позволяет на основании анализа кинематических и силовых параметров, записываемых в процессе ЛСТ, оценить долю тепловой энергии, отводимой в грат, и

получить одномерное распределение температуры в зоне сварки $T(z,t)$.

2. В процессе ЛСТ трением устанавливается равновесие между энергией, подводимой приводом осцилляции, с одной стороны, и энергией выводимой из зоны сварки в грат и отводимой в свариваемые детали, с другой стороны, причем на исследованном сочетании параметров режима в грат отводится более трети подводимой мощности.

3. Несмотря на малую длительность цикла, в процессе сварки практически успевают завершиться процессы теплонасыщения и устанавливается квазистационарное температурное поле.

4. Имеет место устойчивая тенденция к снижению длительности стадии теплонасыщения при переходе от «мягких» режимов к «жестким», а определенная расчетом температура в области стыка при этом практически не меняется.

Исследование выполнено в рамках работ по выполнению постановления правительства РФ №218 от 9 апреля 2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Vairis, A. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti 6Al 4V / A. Vairis, M. Frost // Materials Science and Engineering. 1999. A271. P. 477-484.
2. Vairis, A. Modelling the linear friction welding of titanium blocks / A. Vairis, M. Frost // Materials Science and Engineering. 2000. A292. P. 8-17.
3. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М., Машгиз, 1951. С. 296.
4. Медведев, А.Ю. Моделирование температурного поля при линейной сварке трением / А.Ю. Медведев, С.П. Павлович, В.В. Апрощенко, Н.И. Маркелова // Вестник УГАТУ. 2010. Т.14, №2. С. 76-81.

DETERMINATION THE COMPONENTS OF ENERGY BALANCE AT LINEAR FRICTION WELDING

© 2012 A.Yu. Medvedev, R.V. Nikiforov, A.V. Supov

Ufa State Aviation Technical University

Article is devoted to modeling the temperature profile in the process of linear friction welding. The offered technique allows to estimate a share of thermal energy which is taken away in flash, and to receive univariate distribution of temperature in a welding zone, using the theory of thermal processes by N.N. Rykalin.

Key words: *linear friction welding, modeling, temperature profile, one-dimensional heat conductivity, titanium alloys*

Alexander Medvedev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
at the Department "Equipment and Technologies of Welding Production".

E-mail: medvedevalexandr@inbox.ru

Roman Nikiforov, Post-graduate Student. E-mail: roman.nikiforov.svarka@mail.ru

Andrey Supov, Engineer. E-mail: supov87@mail.ru