

УДК 621.791

А. Ю. МЕДВЕДЕВ, С. П. ПАВЛИНИЧ, В. В. АТРОЩЕНКО, Н. И. МАРКЕЛОВА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ

Предложен подход к моделированию нагрева при линейной сварке трением, основанный на использовании аналитического решения дифференциального уравнения теплопроводности и обработанных экспериментальных данных. Полученная модель позволяет получить результаты, не противоречащие имеющимся экспериментальным данным и представлениям о физике процессов при линейной сварке трением. *Линейная сварка трением; моделирование; компрессор ГТД*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее применение в авиационной промышленности находят новые способы сварки с применением трения, благодаря возможности получения сварных соединений трудносвариваемых материалов с высокими механическими свойствами.

Одним из перспективных для авиационного двигателестроения направлений является линейная сварка трением (ЛСТ), которая применяется для изготовления блисков (от английского *blisk = blades + disk*) такими фирмами, как Boeing, Rolls Royce.

В России ЛСТ пока не имеет промышленного применения. Однако на ОАО УМПО ведутся активные исследования технологических возможностей процесса применительно к изготовлению блисков компрессора ГТД. В настоящее время предприятие имеет лабораторную установку, позволяющую сваривать образцы из титановых сплавов, имеющие поперечное сечение 13×26 мм.

Сущность процесса ЛСТ заключается в следующем: две детали прижимают друг к другу с усилием  $P$ , и одна из них начинает совершать возвратно-поступательные колебания в плоскости стыка с частотой  $f$ , при этом происходит разогрев металла в стыке.

Обязательным условием образования прочного соединения при механических способах сварки, когда соединение формируется в твердой фазе, является обеспечение значительной пластической деформации приповерхностных слоев металла. В случае сварки трением условия деформирования значительно облегчаются, а необходимое внешнее усилие  $P$

снижается путем искусственного увеличения пластичности металла в результате его нагрева. При этом усилие прижатия при сварке трением таково, что не обеспечивает пластической деформации в холодном состоянии. Пластическая деформация и формирование соединения начинаются лишь после разогрева зоны контакта деталей до достаточно высоких температур. Расчет температуры и пластической деформации в сочетании с анализом экспериментальных данных позволит определить условия образования сварного соединения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Процесс формирования сварного соединения можно разделить на три стадии:

1) Стадия нагрева – период времени от начала колебаний до момента начала осадки. На этой стадии тепло, выделяющееся в процессе трения, распространяется в свариваемых деталях за счет теплопроводности. Температура стыка при этом непрерывно растет.

2) Стадия осадки – период времени от начала осадки до окончания осцилляций, где достаточно прогретый на предыдущей стадии металл выдавливается из стыка в грат. При этом устанавливается баланс. Тепло, выделяющееся при трении и пластическом деформировании, уносится в грат с массой выдавленного металла и отводится в тело деталей за счет теплопроводности. Температура стыка стабилизируется.

3) Стадия проковки – период времени от окончания осцилляций до снятия усилия проковки. На этой стадии металл остывает в условиях действия сжимающих напряжений усилия проковки.

В процессе сварки трением тепло выделяется в плоскости контакта заготовок и распро-

страняется в направлении, перпендикулярном плоскости стыка. В таких условиях для описания процесса распространения тепла достаточно дифференциального уравнения в частных производных, описывающего одномерное температурное поле при постоянстве теплофизических свойств, с учетом поверхностной теплоотдачи:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho F} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - bT. \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение (1) может быть решено численно. Кроме того, аппарат математической физики позволяет получить аналитические решения. Так, решением уравнения (1), для случая, когда в момент времени  $t = 0$  в сечении стержня с координатой  $z = 0$  мгновенно вводится количество тепла  $Q$ , является функция [1]:

$$\Delta T = \frac{Q}{c\rho F \sqrt{4\pi a t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at} - bt\right). \quad (2)$$

Для того чтобы получить выражение, описывающее температурное поле от источника тепла, действующего продолжительное время, функция (2) должна быть проинтегрирована по времени. Таким образом, получено уравнение, описывающее распределение температуры в стержне, нагреваемом неподвижным плоским источником тепла:

$$T = T_0 + \frac{1}{c\rho F \sqrt{4\pi a}} \int_0^t \frac{q(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} \times \exp\left(-\frac{z^2}{4a(t-\tau)} - b(t-\tau)\right) d\tau, \quad (3)$$

где  $q(\tau)$  – закон изменения выделяемой мощности со временем;  $t$  – время нагрева;  $F$  – поперечное сечение стержня;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $b$  – коэффициент теплоотдачи;  $c\rho$  – объемная теплоемкость;  $T_0$  – начальный уровень температуры.

Уравнением (3) может быть описано температурное поле на стадии нагрева, в условиях отсутствия пластического течения металла в стыке. С началом пластического течения в стыке характер распределения тепла в свариваемых деталях изменяется – тепло, генерируемое в процессе трения и пластического деформирования, передается не только вглубь свариваемых деталей за счет теплопроводности, но и уносится с массой выдавленного в грат металла. Поэтому предложенный нами подход не может быть применен для расчета температуры в очаге пластической деформации.

Однако протяженность очага пластического деформирования в направлении, перпендикулярном плоскости стыка, мала, ширина грата на принятых для сварки двухфазных титановых сплавов режимах не превышает 0,5...0,6 мм, что составляет 0,25...0,30 мм на одну деталь. Очевидно, что предложенный подход дает возможность расчета поля температур не только на стадии нагрева, но и на стадии осадки. В этом случае источнику тепла необходимо сообщить движение со скоростью равной скорости осадки.

Распределение температуры в стержне, нагреваемом движущимся источником тепла, описывается следующим уравнением:

$$T = T_0 + \frac{1}{c\rho F \sqrt{4\pi a}} \times \int_0^t \frac{q(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} \exp\left(-\frac{(z-fz(\tau))^2}{4a(t-\tau)} - b(t-\tau)\right) d\tau, \quad (4)$$

где  $fz(\tau)$  – закон движения источника тепла.

Зависимость  $fz(t)$  была принята нами в соответствии имеющимися экспериментальными данными об осадке при сварке (рис. 1).

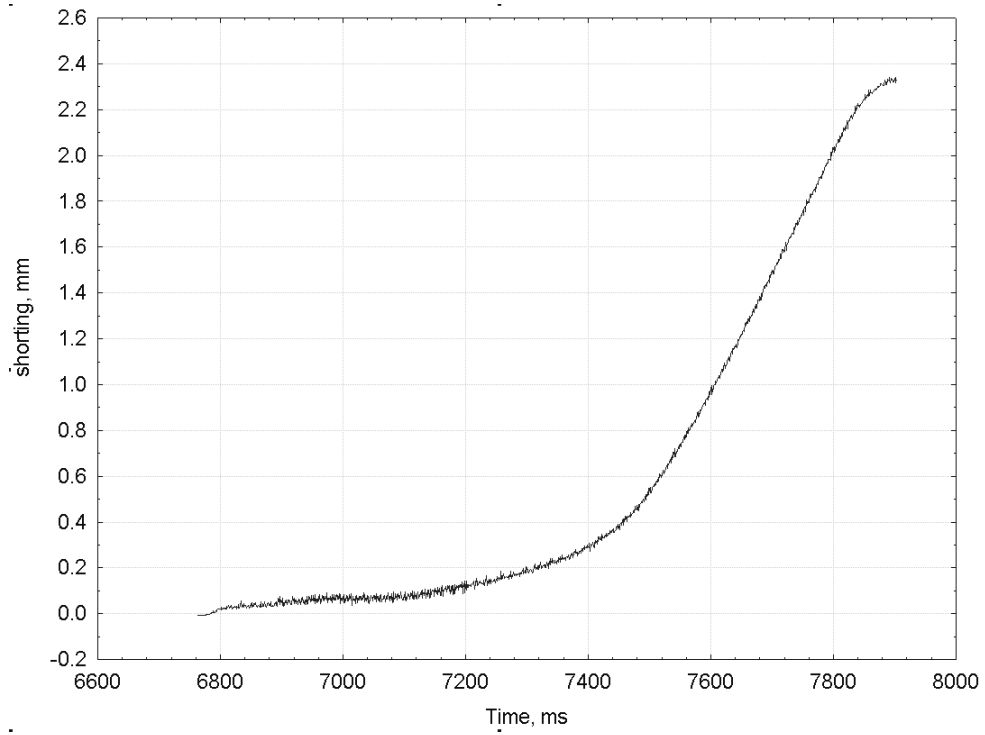
Тепловая мощность, выделяемая при трении, может быть найдена из соотношения:

$$q(t) = F_{\text{тр}} v, \quad (5)$$

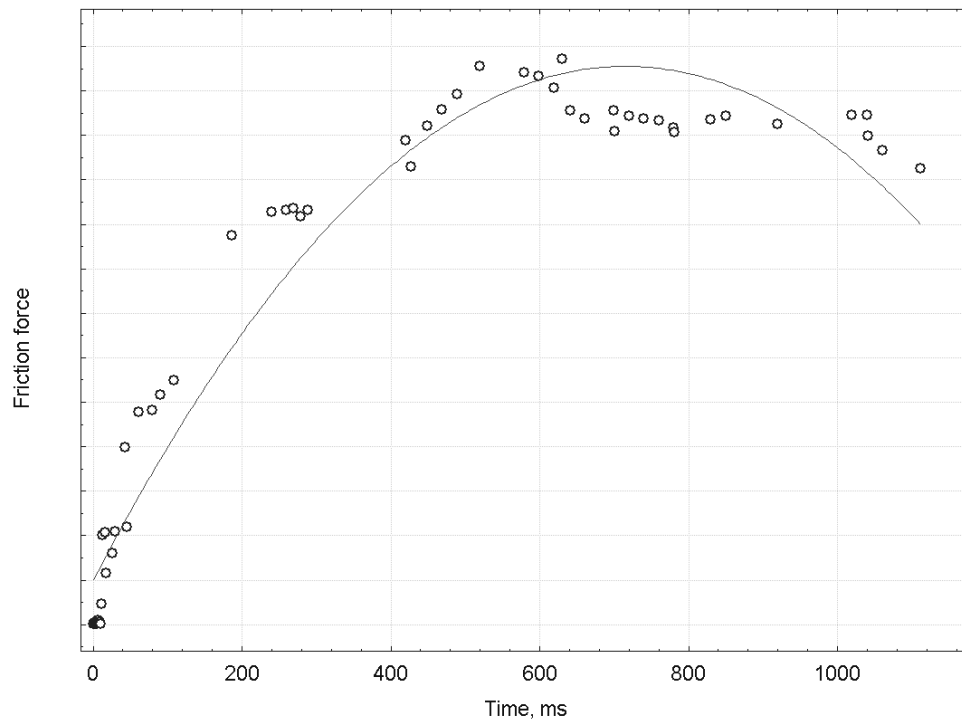
где  $F_{\text{тр}}$  – сила трения;  $v$  – скорость относительного перемещения деталей.

Сила трения зависит от целого ряда факторов [2]: скорости относительного движения поверхностей трения, природы материала и наличия поверхностных пленок, температурного режима, величины нормального давления, жесткости и упругости узла трения. Скорость относительного перемещения поверхностей изменяется от нуля до максимального значения каждые полпериода колебаний, а такие факторы, как температура поверхности и ее состояние претерпевают изменения лишь за время, существенно превышающее период осцилляции.

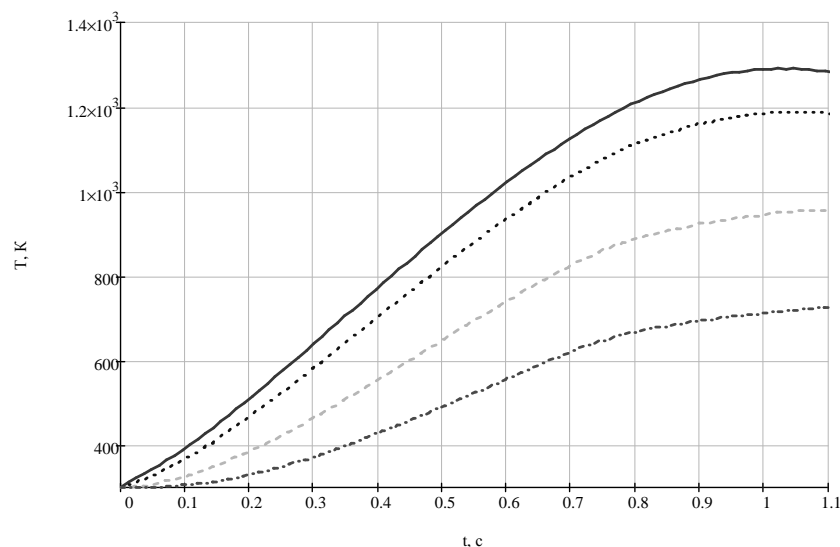
Поскольку при расчете температурного поля колебания выделяемой тепловой мощности, связанные с периодическим законом движения деталей, не представляют интереса, в выражении (5) использовались значения средней скорости относительного движения деталей и значения силы трения для моментов времени, соответствующих движению деталей без ускорения. Рис. 2 иллюстрирует изменения силы трения в процессе сварки, здесь же представлена использованная нами в расчете аппроксимирующая зависимость.



**Рис. 1.** Зависимость осадки от времени в процессе сварки



**Рис. 2.** Изменение силы трения в процессе сварки



**Рис. 3.** Расчетные температуры в сечениях, расположенных на заданном расстоянии от плоскости стыка: — — плоскость стыка; ···· — 0,2 мм от плоскости стыка; --- — 0,75 мм от плоскости стыка; - · - · - — 1,5 мм от плоскости стыка

#### 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Нами был проведен расчет распределений температуры с помощью уравнения (4), для случая нагрева стержня прямоугольного сечения 13×26 мм из сплава ВТ-6. Закон движения источника тепла и генерируемая тепловая мощность были заданы по результатам обработки экспериментальных данных. Наиболее показательны представленные на рис. 3 графики изменения температуры со временем, для сечений, расположенных на заданном расстоянии от плоскости стыка.

Как видно из представленных графиков, температура во всех сечениях с началом сварки начинает увеличиваться, причем практически линейно. По прошествии 0,7 секунд, что соответствует времени начала заметной осадки, скорость роста температуры во всех сечениях начинает снижаться, и к моменту окончания сварки стабилизируется. Максимальный уровень температуры в плоскости стыка составляет 1300 К, на расстоянии 0,2 мм от плоскости стыка 1200 К.

Полученные результаты не противоречат существующим представлениям о процессах, протекающих при линейной сварке трением титановых сплавов: стабилизация температуры на стадии осадки говорит об установившемся режиме пластического течения металла при формировании грата. Полученный уровень максимальных температур согласуется с имеющимися результатами металлографиче-

ских исследований, согласно которым в плоскости стыка металл нагревается до температур  $\alpha \rightarrow \beta$  превращения [3]. Очевидно, что адекватность предложенной модели должна быть подтверждена моделированием температурного поля при иных сочетаниях параметров режима, а также непосредственным измерением температуры в процессе ЛСТ.

#### ВЫВОДЫ

1. Предложенный подход к решению задачи распространения тепла может быть использован для расчета распределения температуры при линейной сварке трением не только на стадии нагрева, но и на стадии осадки.
2. Результаты расчета могут иметь как самостоятельное значение для прогнозирования свойств металла сварных соединений, так и вспомогательное, для дополнения и проверки процедур конечноэлементного моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.
2. Виль В. И. Сварка металлов трением. Л.: Машиностроение, 1970. 175 с.
3. Wanjara P., Jahazi M. Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V: Processing, Microstructure, and Mechanical-Property Inter-Relationship // *Mwtallurgikal and materials transactions A*. August 2005. Vol. 36A. P. 2149-2164.

**ОБ АВТОРАХ**

**Медведев Александр Юрьевич**, доц. каф. оборудования и технологии сварочного пр-ва. Дипл. магистр техники и технологий по машинам и технологии сварочн. пр-ва (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по машинам и техн. сварочн. пр-ва» (Гольятинск. гос. ун-т, 2003). Иссл. в обл. моделир-я нагрева при сварке, аргонодуговой сварки, сварки трением.



**Павлинич Сергей Петрович**, техн. дир. ОАО УМПО. Д-р техн. наук по перспективн. технологиям пр-ва литых деталей для авиамоторостроения (2008). Иссл. в обл. техн. процессов повышения надежности и эксплуатац. характеристик деталей газотурбин. двигателя.



**Атрощенко Валерий Владимирович**, проф., зав. каф. оборудования и технологии сварочного пр-ва. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1974). Д-р техн. наук по автоматизации техн. процессов пр-ва (Ленинградск. электро-техн. ин-т, 1991).



**Маркелова Наталья Ивановна**, доц. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий. Дипл. инженер по техн., оборуд. и автоматизации машиностр. пр-в (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. электродных процессов импульсн. биполярной электрохим. обработки.