

И.В. Ситников, Е.С. Саломатова

I.V. Sitnikov, E.S. Salomatova

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

NUMERICAL SIMULATION OF FRICTION STIR WELDING

Рассмотрена модель сварки трением с перемешиванием. При моделировании учитываются процессы теплопроводности. Благодаря построенной модели возможно определить температуру во всем сварном шве.

This article describes a model of friction stir welding. In the simulation takes into account the processes of heat conduction. Due to the constructed model may determine the temperature around the weld.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, температура сварного шва, теплопроводность, алюминиевый сплав АМг-6, зависимость предела текучести от температуры.

Keywords: friction stir welding, the weld temperature, thermal conductivity, aluminum alloy АМg-6, dependence of the yield stress on temperature.

Сварка трением с перемешиванием (СТП, Friction Stir Welding – FSW) является сравнительно новой технологией, впервые предложенной в СССР и реализованной в современном виде в 1991 г. в Институте сварки (TWI, Cambridge, United Kingdom). Основой данной технологии является трение вращающегося инструмента цилиндрической формы между двумя соединенными торцами или внахлест пластинами металла (рис. 1) [1].

В настоящее время растет интерес предприятий к методу СТП алюминия и его сплавов, так как алюминиевые сплавы обладают высоким показателем отношения прочности и текучести к плотности и превосходят по этим показателям чугун, низкоуглеродистые и низколегированные стали, а также чистый титан, уступая лишь сплавам титана и высоколегированным сталям повышенной прочности.

СТП благодаря ограниченному пространству деформации в сочетании с ограниченным нагревом зоны сварки, твердым состоянием материала сварного шва успешно применяется, демонстрируя следующие преимущества:

– безопасность для окружающей среды, так как не используются вредные газы;

- возможность сварки материалов, недоступных для традиционных способов сварки; высокая прочность сварного шва;
- отсутствие необходимости в присадочной проволоке;
- низкие остаточные напряжения; мелкий размер зерна сварного шва; малый расход энергии;
- отсутствие пористости; отсутствие особых требований к процессу сварки;
- отсутствие необходимости в подготовке кромок под сварку, обработке шва после нее и механической обработке после сварки;
- практически полное отсутствие коробления и термических деформаций;
- уменьшение производственного цикла на 50–75 % по сравнению с обычными способами сварки [2].

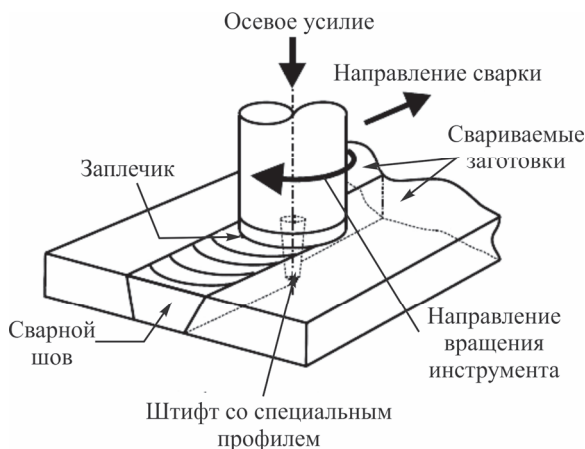


Рис. 1. Процесс сварки трением с перемешиванием

Целью данной работы является построение нелинейной теоретической модели, которая описывает процесс распределения тепла при СТП.

Постановка задачи. Определяющее уравнение и краевые условия. Для построения модели примем следующие предположения: алюминиевые пластины бесконечны, это означает, что при анализе пренебрегаем эффектами вблизи краев пластин; геометрическая модель симметрична вокруг сварного шва, поэтому достаточно смоделировать только одну алюминиевую пластину.

Таким образом, задача сводится к трехмерной. Для решения задачи используем численный метод, позволяющий учесть процессы распределения тепла в алюминиевых пластинах. Расчетная схема представлена на рис. 2.

Система уравнений, описывающая процессы распределения тепла при СТП, включает уравнение теплопередачи в пластине:

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p u \cdot \nabla T,$$

где k – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность; C_p – удельная теплоемкость; u – скорость, в данной модели $u = 1,59 \cdot 10^{-3}$ м/с.

$$q_{\text{шт}}(T) = \frac{\mu}{\sqrt{3(1+\mu^2)}} r_{\text{шт}} \omega \bar{Y}(T),$$

где μ – коэффициент трения; $r_{шт}$ – радиус штифта, мм; ω – угловая скорость штифта, рад/с; $\bar{Y}(T)$ – среднее напряжение сдвига материала, является функцией температуры.

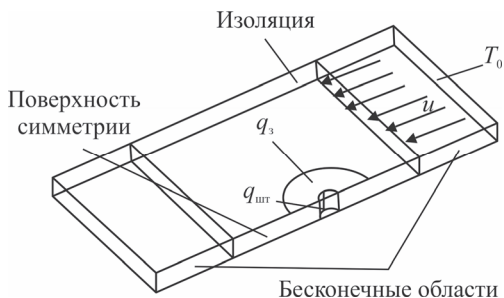


Рис. 2. Расчетная схема задачи

Зависимость предела текучести от температуры показана на рис. 3,

$$q_3(r, T) = \begin{cases} \left(\frac{\mu F_n}{A_3} \right) \omega r, & T < T_{пл}, \\ 0, & T \geq T_{пл}, \end{cases}$$

где F_n – нормальная сила; A_3 – площадь поверхности заплечика; $T_{пл}$ – температура плавления алюминия; μ – коэффициент трения; ω – угловая скорость инструмента.

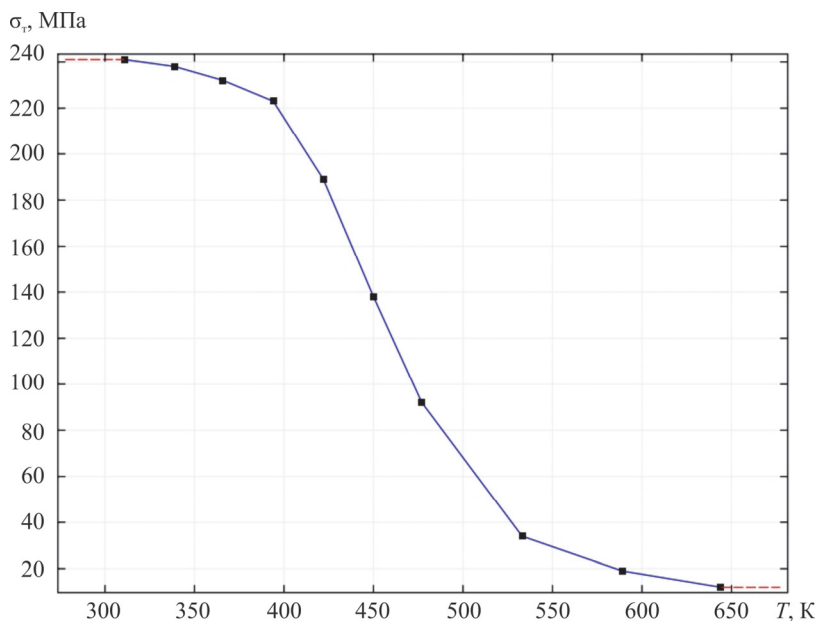


Рис. 3. Зависимость предела текучести от температуры

Выше температуры плавления алюминия трение между инструментом и пластиной будет минимальным. Таким образом, выделение тепла от заплечика и штифта будет равно нулю, когда температура будет выше температуры плавления или будет равна ей.

Тепловой поток для верхней и нижней поверхности пластины:

$$q_{\text{верх}} = h_{\text{верх}} (T_0 - T) + \varepsilon \sigma (T_{\text{окр.возд}}^4 - T^4),$$

$$q_{\text{ниж}} = h_{\text{ниж}} (T_0 - T) + \varepsilon \sigma (T_{\text{окр.возд}}^4 - T^4),$$

где $h_{\text{верх}}$ и $h_{\text{ниж}}$ – коэффициенты теплоотдачи, $h_{\text{верх}} = 12,25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $h_{\text{ниж}} = 6,25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T_0 – нормальная температура; ε – поверхность излучения; σ – постоянная Стефана – Больцмана; $T_{\text{окр.возд}}$ – температура окружающего воздуха.

Для моделирования используем материал АМг-6. Все расчеты были проведены в программе Comsol Multiphysics.

Данные, используемые для расчета при СТП алюминиевого сплава АМг6:

Плотность, кг/м ³	2640
Теплопроводность, Вт/(м·град)	122
Теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·К)	0,922
Динамическая вязкость, Па·с	$2,9 \cdot 10^{-3}$

На рис. 4 показаны результаты распределения тепла в алюминиевой пластине при СТП.

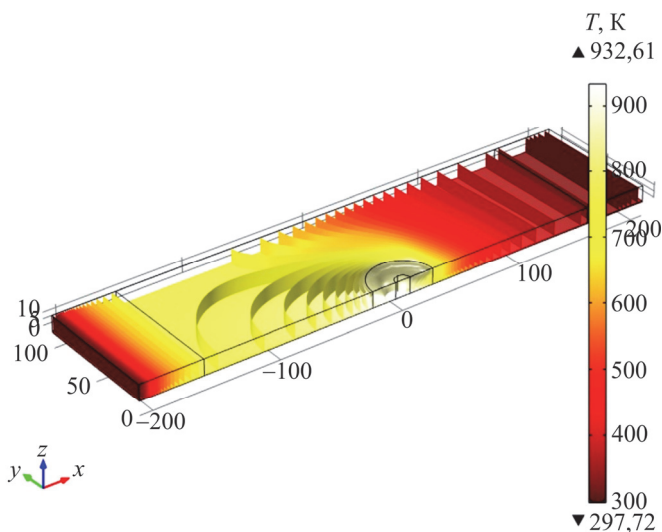


Рис. 4. Распределение температур в алюминиевой пластине при СТП

Высокая температура достигается там, где алюминиевый сплав находится в контакте с вращающимся инструментом. Температура алюминиевого

сплава АМг-6 в месте контакта с вращающимся инструментом приблизительно равна 950 К.

Список литературы

1. Колубаев Е.А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 1–2.

2. Карманов В.В., Каменева А.Л. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2012. – № 32. – С. 72–73.

Получено 7.10.2014

Ситников Илья Владимирович – студент, ПНИПУ, МТФ, гр. ТСП-11-1, e-mail: www.sitya@mail.ru.

Саломатова Екатерина Сергеевна – младший научный сотрудник, ПНИПУ, МТФ, e-mail: weld-katy@mail.ru.