

Моделирование нелинейного трибологического источника тепла

Бикмеев А.Т., Газизов Р.К., Ямилева А.М.

Уфимский государственный авиационный технический университет.

В данной работе изучается эволюция температурного поля при моделировании нелинейного трибологического источника тепла. Модель решается математически методами группового анализа и численно реализуется в инженерном пакете конечно-элементного моделирования ANSYS Mechanical. Вычисления проводятся на суперкомпьютере УГАТУ.

Ключевые слова: выделение тепла при трении, групповой анализ, конечноэлементное моделирование, ANSYS Mechanical, суперкомпьютерные вычисления

Введение

Тепловыделение тепла при трении представляет интерес при решении задач, связанных с так называемым полезным трением, где требуется не минимизация влияния трения, а достижение определенных температурных условий. Данная задача особенно актуальна для изучения процессов сварки трением, а в частности – линейной сварки трением (ЛСТ) [1].

Процесс ЛСТ представляет собой поверхностное соединение деталей при возвратно-поступательном движении друг относительно друга под действием прижимного давления. Данный процесс имеет ряд преимуществ перед другими видами сварки и является перспективным для создания технологии неразъемного соединения свариваемых частей сложной формы, например, для приваривания лопаток к дискам турбин ГТД.

Численное моделирование процесса ЛСТ представляет собой сложную задачу, т.к. необходимо учитывать ряд физических процессов: упруго-пластическое деформирование, выделение тепла при трении и т.д. Рассмотрение отдельных процессов как математически, так и численно позволит получить адекватную численную модель всего процесса ЛСТ.

Данная работа посвящена изучению процесса тепловыделения при трении для получения характера распределения температуры. Интерес к данной задаче был вызван тем, что при моделировании процесса ЛСТ был показан нелинейный характер распределения температуры [2], что должно оказывать существенное влияние на рассматриваемый процесс.

В данной работе рассматривается модель движения прямоугольного образца по плоскости с трением. Цель работы – показать эволюцию полученного температурного поля со временем в случае постоянной скорости, неравномерного давления и коэффициента трения, зависящего от температуры.

Данная модель решена математически с использованием методов группового анализа. Полученное решение использовалось для сравнения с результатом численного моделирования в инженерном пакете конечноэлементного моделирования ANSYS Mechanical. Так как модель нестационарна и имеет ряд нелинейностей, для ее расчета необходимо использование высокопроизводительных вычислительных технологий. Численное моделирование проводилось на суперкомпьютере УГАТУ [3].

Модель распределения давления

Рассматривается двумерная модель процесса скольжения прямоугольного образца длиной L и высотой h , который движется с постоянной скоростью вдоль оси Ox по бесконечной полуплоскости. На верхнюю грань приложено постоянное равномерно распределенное давление P_{ext} , к верхнему левому углу - сдвигающая сила F_{sh} (Рис. 1).

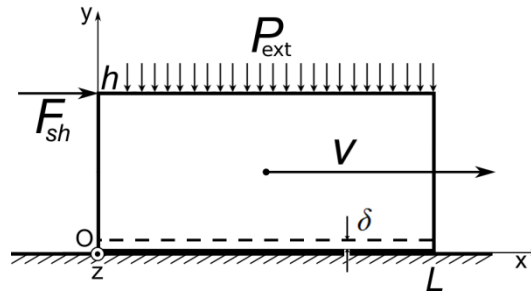


Рис.1. Геометрия задачи

Принят закон трения Кулона. Тогда трибологический источник тепла может быть записан в виде [4]:

$$q = \mu(T)P(x)v,$$

где $\mu(T)$ – коэффициент трения, зависящий от температуры, $P(x)$ – давление в плоскости контакта, зависящее от координаты x . Рассмотрим тонкий слой материала у нижней поверхности образца. В этом случае источник тепла можно представить как объемный, и уравнение теплопроводности примет вид:

$$T_t = a^2(T_{xx} + T_{yy}) + \frac{1}{2c\rho} \mu(T)P(x)v, \quad a^2 = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (1)$$

где $T(x,y,t)$ – температура, λ – коэффициент теплопроводности, c – удельная теплопроводность, ρ – плотность материала. Начальные и граничные условия:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y);$$

$$T_t(x, 0, t) = T_t(0, y, t) = 0;$$

$$T_t(x, h, t) = T_t(L, y, t) = 0.$$

Все вычисления выполнены для двух материалов: алюминиевого сплава А2024 и титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V). Свойства материалов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Свойства материалов [5]

	Титановый сплав ВТ6	Алюминиевый сплав А2024
Модуль Юнга, ГПа	117	68.9
Коэффициент Пуассона	0.31	0.33
Плотность, кг/м ³	4700	2800
Удельная теплоемкость, Дж/(кг К)	530	1230
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м К)	6.7	250

Таблица 2. Коэффициент трения [6]

Температура, К	Титановый сплав ВТ6	Алюминиевый сплав А2024
300	0.44	0.2
1000	0.79	0.55

Если искать контактное давление в форме функции:

$$p(x) = \gamma x + \varepsilon,$$

то, подставляя данную функцию в уравнение баланса сил, получаем значения коэффициентов

$$\gamma = \frac{12\mu P_{ext} h}{L^2}, \quad \varepsilon = \frac{P_{ext}}{L} (L - 6\mu h).$$

Распределение давления примет вид:

$$p(x) = P_{ext} \left[1 + \frac{6\mu h}{L} \left(2 \frac{x}{L} - 1 \right) \right],$$

или, если ввести параметр $g = \frac{\mu \cdot h}{L/2}$, то

$$p(x) = P_{ext} \left[1 + 3g \left(\frac{x}{L/2} - 1 \right) \right].$$

Проведем сравнение этих результатов с данными, полученными численно при конечноэлементном моделировании в инженерном пакете ANSYS Mechanical. Для этого была построена модель согласно постановке задачи, описанной выше, для значений параметров:

$$P_{ext} = 100 \text{ МПа}, h = 13 \text{ мм}, L = 26 \text{ мм},$$

при которых аналитическое решение приближенно равно:

$$P_{Ti}(x) \approx 10153.85 \cdot x - 32.0 \text{ (МПа)},$$

$$P_{Al}(x) \approx 4615.39 \cdot x + 40.0 \text{ (МПа)}.$$

Линейное приближение в целом соответствует зависимости, полученной численно. Но т.к. численное решение показало нелинейную зависимость контактного давления от координаты, найдем распределение давления в другой, степенной, форме:

$$p(x) = \gamma x^\varepsilon$$

Тогда решение будет записано в виде:

$$p(x) = P_{ext} \frac{1+g}{1-g} \left(\frac{x}{L} \right)^{2 \frac{g}{1-g}}.$$

На рисунке 2 показано сравнение с численным решением. Видно, что степенная модель не имеет значительных отличий от линейной модели, поэтому для дальнейших расчетов достаточно использовать линейную модель.

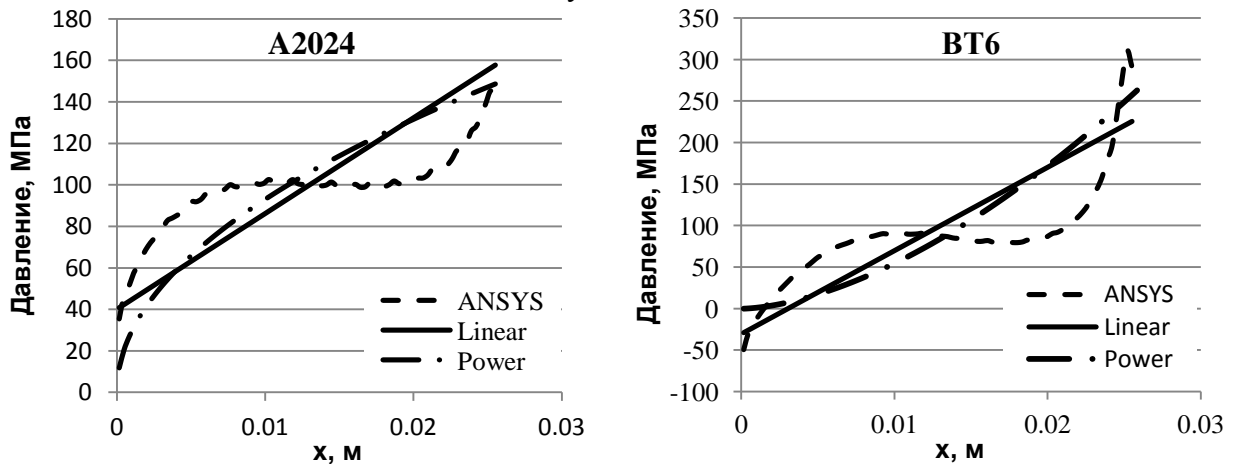


Рис.2. Различные модели распределения давления в области контакта и результаты численного моделирования в ANSYS Mechanical для алюминиевого (слева) и титанового (справа) сплавов

Тем не менее, для алюминиевого сплава степенная модель дает лучшее приближение чем линейная, в то время как для титанового сплава линейная модель более предпочтительна.

Моделирование распределения температуры

Для получения распределения температуры при трении решим уравнение (1), используя линейную модель аппроксимации распределения контактного давления. Тогда уравнение (1) примет вид:

$$T_t = a^2(T_{xx} + T_{yy}) + \frac{v}{2c\rho} \frac{(\alpha T + \beta)(\gamma x + \varepsilon)}{\delta}$$

Проведя ряд преобразований, найденных методами группового анализа, получаем распределение температуры (в безразмерном виде):

$$\theta(\tau, \xi, \eta) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\tau}} \int_{\eta_0}^{\eta_1} \int_{\xi_0}^{\xi_1} e^{-\frac{(\xi-\zeta)^2 + (\eta-\chi)^2}{4\tau}} \theta_0 d\zeta d\chi,$$

где θ - безразмерное преобразованное значение температуры, τ - времени, ξ и η - координат x и y соответственно. Для получения численных значений решение уравнения выражается через функции ошибок.

Таким образом, было получено распределение температуры вследствие трения при движении образца в одном направлении с постоянной скоростью. Так как в процессе линейной сварки трением образцы движутся возвратно-поступательно, полученное решение можно использовать для оценки распределения температуры в процесс с помощью сложения для движения в противоположных направлениях.

На рисунке 3 (слева) показано полученное распределение температуры в процессе ЛСТ для различных материалов.

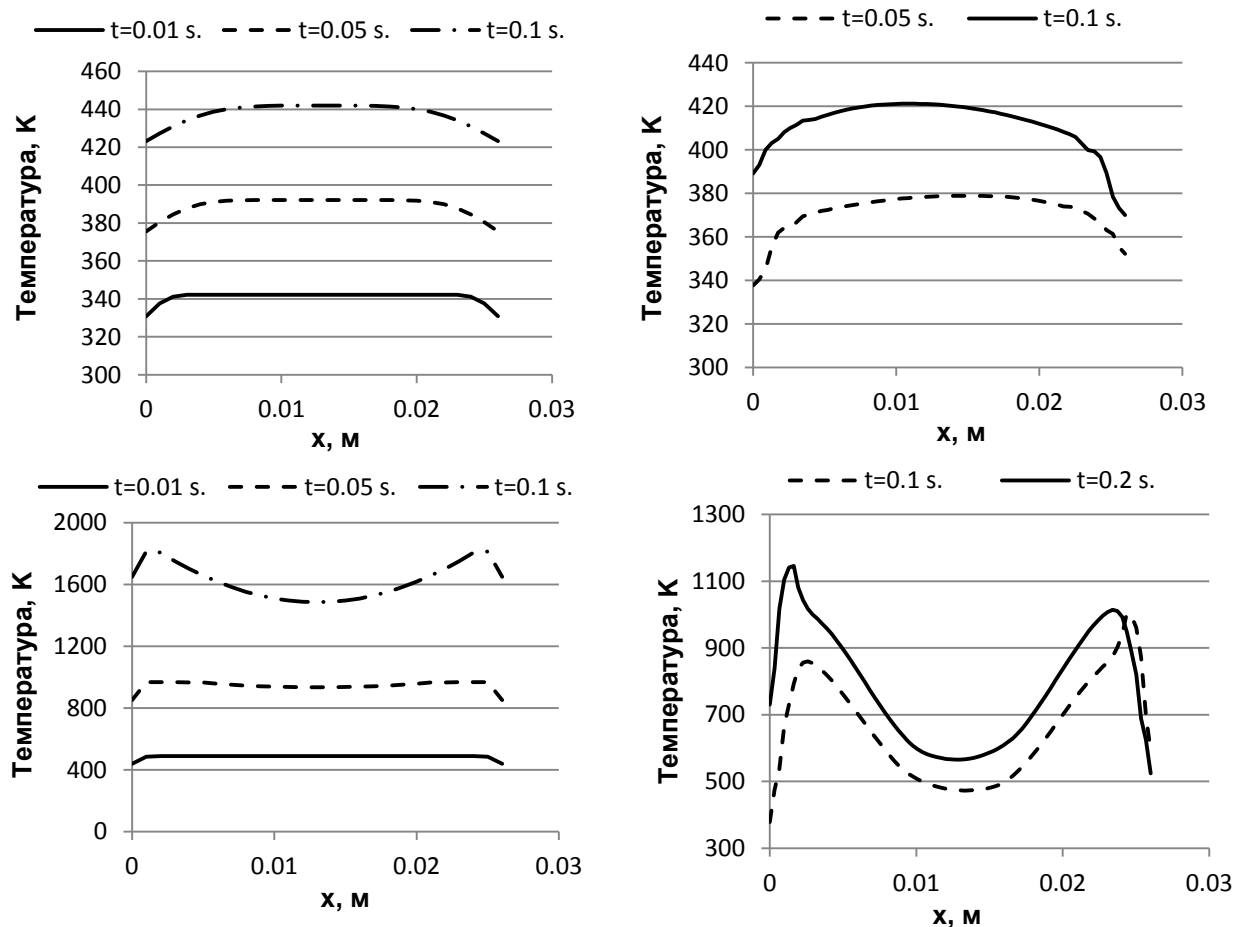


Рис.3. Распределение температуры в области контакта в процессе ЛСТ, полученное аналитически (слева) и численно в ANSYS Mechanical (справа) для алюминиевого (сверху) и титанового (снизу) сплавов

Для сравнения результатов математической модели с численными результатами была построена модель процесса ЛСТ для параметров, описанных выше. Результаты показаны на рисунке 3 (справа).

В случае алюминиевого сплава наблюдается хорошее количественное и качественное согласие. Температурное распределение имеет вид выпуклой функции с максимумом в центре, причем со временем абсолютное значение градиента увеличивается без изменения характера распределения.

Для титанового сплава количественного согласия получить не удалось. Тем не менее, наблюдается качественное согласие результатов: распределение температуры имеет два пика около боковых граней образца, растущих со временем. Отличие распределения температуры для различных материалов обусловлено разницей в распределении давления в контактной области – в случае линейного распределения основное влияние оказывает величина угла наклона графика.

Заключение

Была рассмотрена двумерная модель скольжения с трением прямоугольного образца по бесконечной полуплоскости для получения распределения температуры. Получено решение как аналитически, так и численно с использованием пакета ANSYS Mechanical, проведено сравнение полученных результатов.

Показано, что распределение давления в контактной области при скольжении неравномерно и может быть представлено в виде функции от координаты. Аналитически найдено линейное и степенное приближение распределения давления, согласующееся с численным решением.

С использованием функции распределения давления изучено распределение температурное поле, производимое нелинейным трибологическим источником, выполняющим колебания вдоль оси Ox . Показана эволюция полученного температурного поля со временем в случае постоянной по модулю скорости, неравномерного давления и коэффициента трения, зависящего от температуры.

Достигнуто качественное, а в случае алюминиевого сплава A2024 и количественное, согласие между аналитической и численной моделью.

Работа выполнена при поддержке гранта правительства Российской Федерации по постановлению № 220 "О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования" по договору № 11.G34.31.0042, заключенным между Министерством образования и науки РФ, ведущим ученым Ибрагимовым Н.Х. и ФГБОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет".

Литература

1. A.Vairis, M.Frost. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti6Al4V. Material Science and Engineering. A 271, (1999), pp 477—484.
2. Ямилева А.М., Медведев А.Ю., Насибуллаев И.Ш., Александров И.В., Ваирис А. Построение двумерной модели процесса линейной сварки трением с учетом этапа проковки // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. Уфа, 2012. Т.16, №7 (52) – С. 117-121
3. Суперкомпьютер УГАТУ, высокопроизводительные вычисления // Управление Информационных Технологий УГАТУ. URL: <http://www.ufa-rb.ru/supercomputer> (дата обращения: 15.09.2013).
4. B.Bhushan Modern Tribology Handbook, Volume One: Principles of Tribology. — CRC Press LLC, 2001. – 765 p.

5. Reology Database of FORGE 2011 software.
6. A. Vairis, M. Frost Modelling the linear friction welding of titanium blocks — Materials Science and Engineering A292, (2000), pp. 8-17.