

СРАВНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ И ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ

В. Р. Галимов¹, В. О. Лазунова¹

¹galimov.vitalij-r01@net.ugatu.su, nikasmolnikova@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Аннотация. С целью сравнительной оценки возможности моделирования тепловых полей в процессе линейной сварки трением разными методами в работе представлены результаты расчета для образцов из титанового сплава ВТ6, полученных аналитическим способом и методом конечных разностей. Построены графики термических циклов, полученных обоими методами. Построена функция расхождения результатов разностного и аналитического моделирования при вычислении термических циклов. Проанализированы расхождения результатов на различных этапах процесса.

Ключевые слова: линейная сварка трением; моделирование; конечно-разностное моделирование; температурное поле; титановые сплавы.

ВВЕДЕНИЕ

Линейная сварка трением (ЛСТ) получила промышленное применение относительно недавно – в первые годы XXI века. Линейная сварка трением представляет собой твердофазный процесс сварки материалов путем тесного контакта пластифицированных свариваемых поверхностей, при котором тепло генерируется трением, производимым возвратно-поступательным движением одной детали относительно другой под давлением (рис.1).

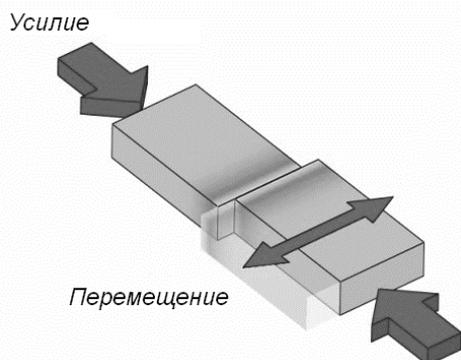


Рис. 1. Схема процесса ЛСТ

Одной из главных особенностей ЛСТ является возможность сварки разнообразных материалов и их комбинаций – имеются работы, посвященные сварке сталей, тита-

новых и алюминиевых, никелевых сплавов и даже неметаллических материалов [1-5]. Отдельно стоит сказать о возможности сваривать между собой сочетания материалов: работы, посвященные сварке разнородных титановых сплавов и систем железо-алюминий, титан-алюминий, железо-титан, алюминий-медь описаны, например, в [6-7].

При исследовании процессов, происходящих при формировании сварного соединения, важным вопросом является определение температурного поля при сварке. Экспериментальная оценка температур затруднена рядом причин [8], в связи с чем основным инструментом оценки температурных полей является моделирование тепловой задачи.

Моделированию процесса линейной сварки трением посвящен ряд работ, описывающих как отдельные стадии процесса, так и всю сварку в целом. Модели встречаются двумерные и трехмерные, рассчитываемые аналитическими или численными методами. Отдельного внимания заслуживают две модели. Первая основана на аналитическом расчете тепловых полей и предназначена в случае сварки деталей из одного материала [9]. Вторая основана на методе конечных разностей (МКР) и разработана для оценки

температур при сварке сочетаний материалов, хотя может применяться и для случая сварки однородных материалов. Подробнее она описана в [10].

Обе модели отличаются небольшими требованиями к вычислительным мощностям, что позволяет легко их использовать для изменяющихся условий сварки, когда появляется необходимость в корректировках модели.

Целью работы является сравнительный анализ данных двух моделей для определения степени их расхождения.

АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

Для проведения анализа используются результаты сварки опытных образцов из сплава ВТ6 (двухфазный $\alpha+\beta$ сплав) размерами 26x13мм. Сварка проводилась на одинаковых режимах с осадкой 2мм. График осадки одного из образцов представлен на рис. 2. Сравнение проводилось на примере 6 образцов.

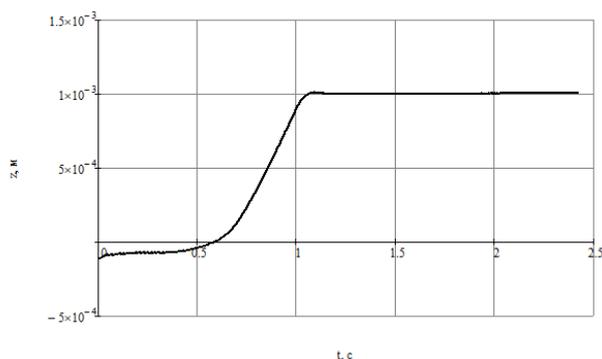


Рис. 2. Осадка одного из образцов

Для оценки различий в результатах расчетов были построены термические циклы с помощью обеих моделей в нескольких сечениях: непосредственно в стыке, на расстоянии 0,3, соответствующем границе шва, и 1мм от стыка (рис. 3-5).

Так же на графиках термического цикла построена кривая, соответствующая относительному расхождению результатов аналитического и конечно-разностного способов расчета.

Анализ представленных термических циклов показывает, что температуры в стыке на стадии разогрева практически совпадают, однако, на стадии интенсивной пластической деформации (0,6-1сек) начинают

расходиться. При этом максимальное значение погрешности наблюдается в стыке и составляет около 9%. Однако уже на границе шва (в 0,3мм от стыка) разница становится около 7%, а на расстоянии 1мм меньше 5%. То есть, модели показывают разницу 7-9% в показаниях температур в зоне шва.

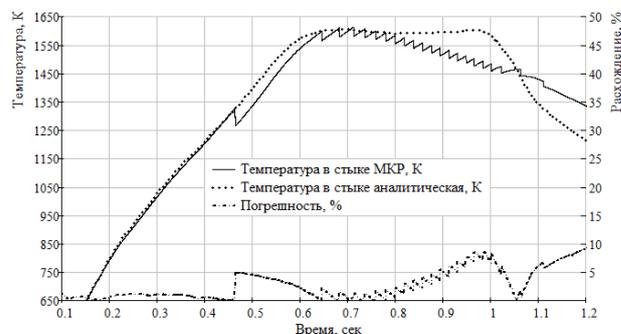


Рис. 3. Термические циклы в стыке при ЛСТ образцов из ВТ6

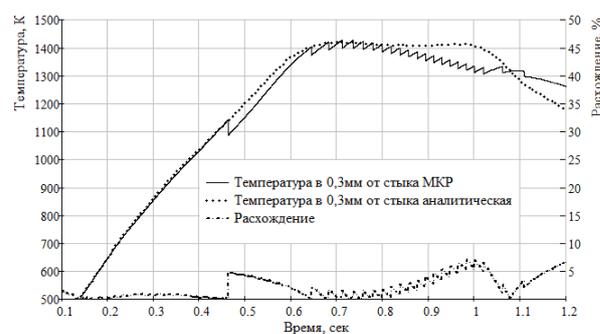


Рис. 4. Термические циклы в 0,3 мм от стыка при ЛСТ образцов из ВТ6

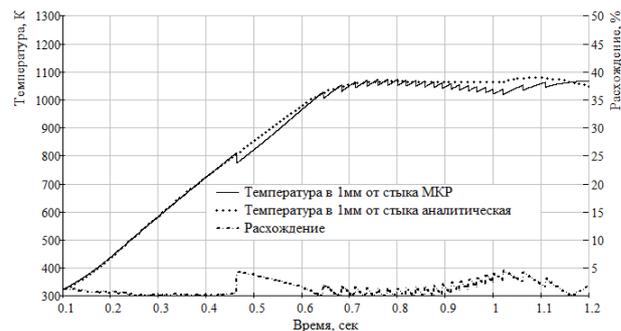


Рис. 5. Термические циклы в 1,0 мм от стыка при ЛСТ образцов из ВТ6

Расхождение в температурах на стадии интенсивного пластического деформирования связано с разными методами отвода тепла в грат. В случае аналитического моделирования, отвод тепла производится через слой, равный по ширине половине ширины шва и имеющий некоторую среднюю температуру, определяемую эмпирически.

При разностном моделировании, тепло отводится вычитанием слоев в соответствии с кривой осадки. Однако, есть предположение, что проблема заключается в механизме задания ввода тепла в границу трения, что требует дополнительного анализа, в том числе на примере сварки с большей осадкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На стадии нагрева термические циклы, вычисленные обеими моделями, совпадают.

2. Расхождение начинается на установившейся стадии, сопровождающейся осадкой деталей. Наибольшее расхождение наблюдается в стыке, однако на удалении от него разница быстро уменьшается.

3. Во всех сечениях расхождение результатов менее 10%, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальное значение погрешности

Расстояние от стыка, мм	Время, сек	Значение погрешности, %
0	0,98	9
0,3	0,98	7
1,0	1,025	5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bhamji I., Preuss M., Threadgill P. L., Addison A. C.** Solid state-joining of metals by linear friction welding: A literature review // *Materials Science & Technology* 2010, Vol.27, No.1, Jan 2011, с. 2-12. [I. Bhamji, M. Preuss, P. L. Threadgill, A. C. Addison, "Solid state-joining of metals by linear friction welding: A literature review" in *Materials Science & Technology* 2010, Vol.27, No.1, Jan 2011, с. 2-12.]

2. **Nicholas E. D.**, Friction surfacing and linear friction welding // *International SAMPE metals and metals proc. conf.*, Covina, CA, USA, с. 450-463, , 1992 [E. D. Nicholas, "Friction surfacing and linear friction welding" in *International SAMPE metals and metals proc. conf.*, Covina, CA, USA, P. 450-463, 1992]

3. **Kallee S. W., Nicholas E. D., Russell M. J.**, Friction welding of aeroengine components // *The 10th World conf. on titanium Ti-2003.*, Hamburg, Germany, с. 2859-2867, 2003 [S. W. Kallee, E. D. Nicholas, M. J. Russell "Friction welding of aeroengine components" in *The 10th World conf. on titanium Ti-2003*, Hamburg, Germany, p. 2859-2867, 2003]

4. **Dalgaard E.** Evolution of microstructure, microtexture and mechanical properties of linear friction welded IMI 834 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/1879139512Y.0000000014> (дата обращения 19.03.2020). [E. Dalgaard "Evolution of microstructure, microtexture and mechanical properties of linear friction weld

ed IMI 834" [Online]. Available: <https://tandfonline.com/doi/abs/10.1179/1879139512Y.0000000014>]

5. **Corzo M., Torres Y., Anglada M., Mateo A.**, Fracture behaviour of linear friction welds in titanium alloys. *Anales de la Mecanica de Fractura*, 2007, P. 75-80. [M. Corzo, Y. Torres, M. Anglada, A. Mateo "Fracture behaviour of linear friction welds in titanium alloys". *Anales de la Mecanica de Fractura*, p. 75-80, 2007]

6. **Bhamji I.**, Linear friction welding of aluminium to copper / I. Bhamji, R. J. Moat, M. Preuss, P. L. Threadgill, A. C. Addison, M. J. Peel, *Science and technology of Welding and joining*, vol.17 №4, p. 314-320, 2012 [I. Bhamji, Linear friction welding of aluminium to copper / I. Bhamji, R. J. Moat, M. Preuss, P. L. Threadgill, A. C. Addison, M. J. Peel in *Science and technology of Welding and joining*, vol.17 №4, p. 314-320, 2012]

7. **Медведев А. Ю.** Применение линейной сварки трением для соединения титановых сплавов VT6 и VT8-1 / А. Ю. Медведев, В. М. Бычков, А. С. Селиванов, С. В. Павлович, С. Х. Даутов, А. В. Супов // *Вестник УГАТУ*. 2012. № 7. – С. 63–67 [Medvedev A. Y. "The use of linear friction welding for VT6 and VT8-1 titanium alloys" (in Russian) / Medvedev A. Y., Bichkov V. B., Selivanov A.S., Pavlinich S.V., Dautov S.H., Supov A.V. in *Vestnik UGATU*, No. 7. p. 63-67, 2012]

8. **Vairis A.** Modelling the linear friction welding of titanium blocks / A. Vairis, M. Frost, *Materials Science and Engineering*, A292 P. 8-17, 2000 [A. Vairis "Modelling the linear friction welding of titanium blocks" / A. Vairis, M. Frost in *Materials Science and Engineering*, A292 P. 8-17, 2000]

9. **Медведев А. Ю.** Определение составляющих энергетического баланса при линейной сварке трением / А. Ю. Медведев, Р. В. Никифоров, А. В. Супов, *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. №1-2., с. 392-395, 2012. [A. Y. Medvedev "Determination of the components of the energy balance in linear friction welding" / Medvedev A. Y., Nikiforov R.V., Supov A.V. in *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiiskoi akademii nauk*, No. 1-2, p.392-395,2012]

10. **Медведев А. Ю.** Конечно-разностная модель температурного поля при линейной сварке трением / В. Р. Галимов, А. Ю. Медведев, И. М. Гатиятуллин, О.В. Муругова, *Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2019) Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию ООО "Кузбасский центр сварки и контроля*. С. 80-87, 2019 [Medvedev A. Y. "The finite-difference model of a temperature field at Do-linear friction welding" / Medvedev A. Y, Gatiyatullin I.M., Murugova O.V. in *Innovacii v toplivo-energeticheskom komplekse I mashinostroenii (TEK-2019) Sbornik nauchnih trudov II Mezhdunarodnoi nauchno-practicheskoi konferencii, posvyashennoi 20-ti letiyu OOO "kuzbasskii centr svarki I kontrolya* p.80-87,2019]

ОБ АВТОРАХ

ГАЛИМОВ Виталий Рустемович, ассистент каф. СЛАТ. Дипл. магистр 15.04.01 (УГАТУ, 2017). Готовит дис. о сварке трением биметаллических сплавов.

ЛАЗУНОВА Вероника Олеговна маг. каф. СЛАТ. Дипл. бакалавр (ФГБОУ «УГАТУ» 2018). Готовит дис. о исследовании математических моделей ЛСТ.

METADATA

Title: Comparison of analytical and numerical model for calculating a temperature field in linear friction welding.

Authors: V. R. Galimov¹, V. O. Lazunova²

Affiliation:

^{1,2} Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹ gusarenko@mail.ru, ² mironov@list.ru,

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (23), pp. 23-26, 2020. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: For the purpose of comparative assessment of possibility of modeling of thermal fields in linear friction welding process by different methods, calculation results for samples from titanium alloy of BT6 obtained by analytical method and finite difference method are presented in the work. Graphs of thermal cycles obtained by both methods are constructed. The function of divergence of results by the method of finite differences and analytical modeling in calculation of thermal cycles is built. Differences of results at different stages of the process were analysed.

Key words: linear friction welding, modeling, finite-difference modeling, temperature field, titanium alloys.

About authors:

GALIMOV, Vitaly Rustemovich, assistant, Dept. of Welding, cast and additive technology. Master of Engineering (USATU, 2017).

LAZUNOVA, Veronika Olegovna, master of Engineering, Dept. of Welding, cast and additive technology. Dipl. bachelor (USATU 2018).