

А. О. Чукалова, А. М. Ямилева, И. Ш. Насибуллаев, А. Ваирис

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА НА ДИНАМИКУ ПРОЦЕССА ЛИНЕЙНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

В данной работе проводится изучение степени влияния изменения параметров модели материала на распределение температуры и напряжений в процессе линейной сварки трением (ЛСТ). Исследование проводится методами факторного вычислительного эксперимента на основе двухмерной компьютерной модели упругой стадии процесса ЛСТ. *Линейная сварка трением; компьютерное моделирование; вычислительный эксперимент*

### ВВЕДЕНИЕ

Математическое и компьютерное моделирование сложных технологических процессов позволяет уменьшить временные и ресурсные затраты. С помощью вычислительных экспериментов можно определить зависимость между входными и выходными параметрами процесса. Оценка чувствительности модели к изменению входных данных позволяет определить устойчивость модели, а также возможность решения обратной задачи: вычисления значений входных параметров для необходимых величин выходных параметров.

В числе входных параметров, в частности, присутствуют свойства материала. Данная работа посвящена определению чувствительности численной модели упругой стадии процесса линейной сварки трением (ЛСТ) [1–3] к изменению параметров материала. По полученным зависимостям можно подобрать свойства материала для получения необходимых результатов. Возможно проведение оценки выходных параметров модели для материалов, отличных от использованного при расчете.

Кроме того, современные методы измерения свойств материала позволяют определить величину с некоторой погрешностью, включающую

в себя погрешность приборов и инструментов, методики измерения и т. д. Незначительное отклонение состава сплава в пределах допустимой нормы также оказывает влияние на физические свойства материала. Следовательно, результаты численного моделирования для конкретного материала также имеют косвенную погрешность, которую также можно оценить, определив чувствительность модели к изменению материальных параметров. Результаты исследования позволят оценить точность модели в зависимости от точности используемых данных.

Для оценки чувствительности процесса ЛСТ были проварьированы значения физических и механических свойств используемого титанового сплава ВТ6 [4]. На основании проведенных расчетов сделано заключение о степени влияния различных материальных параметров на динамику процесса ЛСТ.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При математическом моделировании упругой стадии процесса ЛСТ необходимо учитывать следующие физические явления:

- скольжение одного тела по поверхности другого (используются законы механики и трибологии);
- нагрев и остывание (используются законы термодинамики);
- упругие деформации (используются законы теории упругости и термодинамики).

При этом модель материала учитывается в уравнениях в виде параметров.

Распределение температуры в объеме образца определяется уравнением теплопроводности [5]:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \nabla T),$$

Контактная информация: 8(347)292-19-31

Работа выполнена в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений» (шифр 2010-218-01-133) в рамках реализации Постановления № 218 правительства РФ от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Таблица 1

Исходные параметры материала (основное значение ± 5%)

Температура, T, К	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, с, Дж/(кг·К)	Коэффициент удельного теплового расширения, α*, 10 <sup>-6</sup> ·К <sup>-1</sup>	Плотность, ρ, кг/м <sup>3</sup>	Температура, К	Модуль Юнга, E, МПа	Коэффициент Пуассона, ν
292	8,37 ± 0,419	580 ± 29	0	4450 ± 222,5	292	117 ± 5,85	0,31 ± 0,0155
372	9,21 ± 0,461	580 ± 29	8,26 ± 0,413		477	107 ± 5,35	
472	10,88 ± 0,544	586 ± 29,3	8,77 ± 0,439		699	95 ± 4,75	
572	11,7 ± 0,585	670 ± 33,5	9,28 ± 0,464		921	83 ± 4,15	
672	12,56 ± 0,628	712 ± 35,6	9,79 ± 0,49				
772	13,82 ± 0,691	795 ± 39,75	10,3 ± 0,515				
872	15,49 ± 0,775	879 ± 43,95	10,8 ± 0,54				

\*проведена аппроксимация данных методом наименьших квадратов

где  $T$  – температура,  $t$  – время,  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К). Нагрев в результате трения входит в выражение в качестве граничных условий.

При деформировании тела, сопровождающемся изменением температуры (как вследствие внешнего нагрева, так и в результате самой деформации), тензор внутренних напряжений задается выражением [6]:

$$\sigma_{ik} = -K\alpha(T - T_0)\delta_{ik} + K\varepsilon_{ll}\delta_{ik} + 2\mu\left(\varepsilon_{ik} - \frac{1}{3}\delta_{ik}\varepsilon_{ll}\right), \quad (1)$$

где  $\sigma_{ik}$  – тензор напряжений, Па;  $T$  – температура, К;  $T_0$  – реперная температура для коэффициента теплового расширения, К;  $\varepsilon_{ik}$  – тензор деформаций;  $K$  – модуль всестороннего сжатия, Па;  $\mu$  – модуль сдвига, Па;  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения, К<sup>-1</sup>,  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера. Материал считается изотропным.

Модуль всестороннего сжатия  $K$ , Па, и модуль сдвига  $\mu$ , Па, связаны с модулем Юнга  $E$ , Па, и коэффициентом Пуассона  $\nu$  следующим образом [6]:

$$E = \frac{9K\mu}{3K + \mu}, \quad \nu = \frac{1}{2} \frac{3K - 2\mu}{3K + \mu}.$$

Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$\sigma_{ik} = -\frac{E}{1 - 2\nu}\alpha(T - T_0)\delta_{ik} - \frac{E\nu}{2\nu^2 + \nu - 1}\varepsilon_{ll}\delta_{ik} + \frac{E}{2(\nu + 1)}\varepsilon_{ik}(1 + \delta_{ik}).$$

Таким образом, в предположении изотропности материала в рассматриваемой модели используется шесть материальных параметров: плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент удельного теплового расширения.

Для исследования чувствительности модели к параметрам материала, приведенным выше, использовалась двумерная компьютерная модель упругой стадии процесса ЛСТ, построенная в пакете ANSYS Mechanical [3], параметры процесса: амплитуда 2 мм, частота 50 Гц, прижимное усилие 35 кН.

В модели использованы параметры титанового сплава ВТ6 [4]. В качестве основных значений материальных параметров были взяты данные из библиотеки материалов инженерного пакета Deform-3D ( $E$ ,  $\nu$ ) и марочника сталей и сплавов ( $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha$ ) [7]. Все материальные параметры даны в виде табличной зависимости от температуры (табл. 1). Диапазон рассматриваемых температур – от 292 до 872 К. Для коэффициента теплового расширения  $\alpha$  проведена линейная аппроксимация методом наименьших квадратов вследствие недостаточного исходного температурного диапазона (292–672 К).

Для определения характера чувствительности численной модели к малым изменениям материальных параметров была проведена серия расчетов, в которой параметры, приведенные выше, независимо варьировались на 5 % (табл. 1). Упругие деформации подчиняются линейному закону Гука, но уравнение теплопроводности и зависимость параметров от температуры могут привести к нелинейному отклику, поэтому дополнительно проводилась вариация

ция параметров на 10 % для оценки влияния нелинейности. Таким образом, было проведено 25 расчетов.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для анализа полученных результатов на верхнем образце введены две контрольные линии: LX – линия стыка образцов, и LY – вертикальная ось, проходящая через линию симметрии верхнего образца (рис. 1), вдоль которых рассматривалось распределение температуры ( $T$ ) и напряжения по Мизесу ( $S$ ) через 0,2 с после начала движения. Также одним из результатов модели считалась ширина зоны термического влияния ( $H$ ) – толщина значительно прогретого слоя (температура выше 300 К).

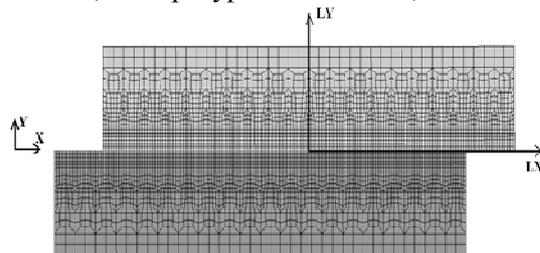


Рис. 1. Геометрия задачи и контрольные линии

Результаты расчетов, проведенных при варьировании параметров на 5 %, приведены в табл. 2.

Максимальное влияние на изменение температуры вдоль контрольной линии LY оказывает варьирование удельной теплоемкости и плотности. В этом случае температура повышается на 10,59 К по линии LX и на 7,97 К по линии LY, т. е. на 1,8 и 1,6 % соответственно (рис. 2). Влияние изменения коэффициента удельного теплового расширения, коэффициента Пуассона и модуля Юнга на температурное поле пренебрежимо мало – изменение температуры как вдоль линии LY, так и вдоль линии LX менее 0,1 %.

Изменение материальных параметров (например, рис. 2, а) оказывает наибольшее влияние на распределение температуры и напряжений в центральной области контакта, т. е. в области непрерывного контакта. У боковых граней образцов, где контакт периодически отсутствует, влияние изменения материальных параметров минимально.

Оценим влияние изменения теплофизических свойств на ширину зоны термического влияния (ЗТВ) через 0,2 с после начала движе-

ния. Для определенности примем за ширину ЗТВ толщину значительно прогретого слоя (рис. 2, б), т. е. толщину области, где градиент температуры существенно больше нуля. Для простоты возьмем пороговое значение градиента 20 К/мм, что примерно соответствует пороговой величине температуры 300 К.

Таблица 2  
Процентное изменение показателей температуры и напряжения вдоль осей LX и LY при изменении каждого фактора на 5 %

		Относительное изменение показателей*, %				Ширина ЗТВ, $\delta H$
		Макс. значение температуры вдоль контр. линий, $\delta T$		Макс. значение напряжения вдоль контр. линий, $\delta S$		
		LX	LY	LX	LY	
Варьируемые параметры	c	<b>1,8</b>	<b>1,45</b>	2,4	2,6	< 0,1
	$\rho$	<b>1,6</b>	<b>1,45</b>	2,6	2,6	<b>4,4</b>
	$\lambda$	1,6	1,3	2,95	2,6	<b>5,8</b>
	E	< 0,1	< 0,1	<b>3,3</b>	<b>4,1</b>	2,7
	$\alpha$	< 0,1	< 0,1	<b>3,3</b>	<b>4,1</b>	< 0,1
	$\nu$	< 0,1	< 0,1	0,3	1,1	< 0,1

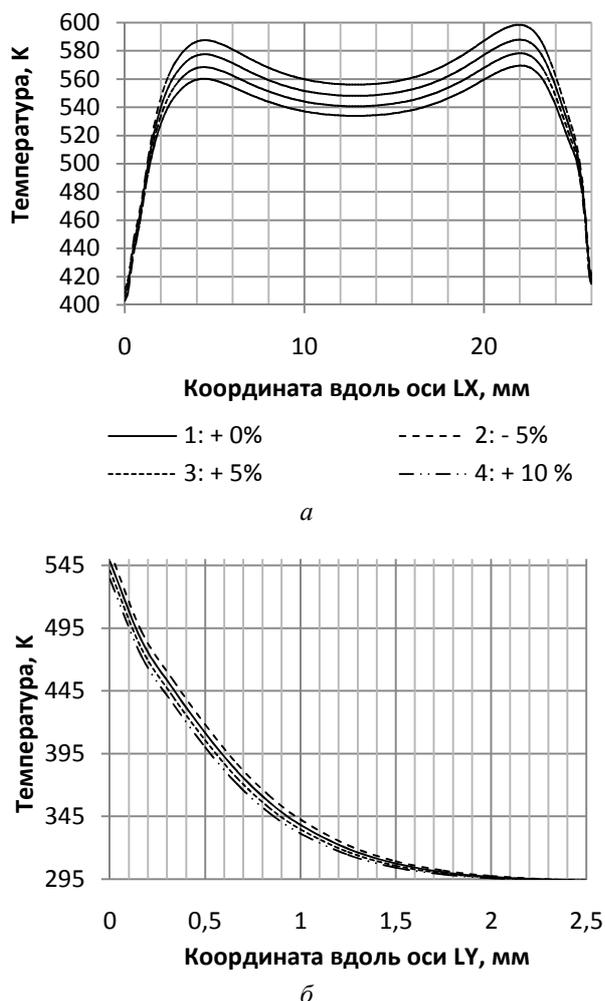
\*полу жирным шрифтом выделены значения для наиболее влияющих параметров

При неизменных параметрах ширина ЗТВ составляет 1,8 мм. Наибольшее влияние на ширину ЗТВ оказало изменение плотности материала: при уменьшении параметра на 5 % ширина ЗТВ увеличилась до 1,91 мм, т. е. на 5,7 %. Изменение модуля Юнга, коэффициента теплового расширения и коэффициента Пуассона оказывают существенно меньшее влияние на ширину ЗТВ, которая меняется не более чем на 0,1 %.

При изучении влияния варьируемых параметров на напряжение наблюдается обратная картина – максимальное влияние оказывают механические параметры: модуль Юнга и коэффициент удельного теплового расширения. В частности, максимальная разница между величинами напряжений для основных и измененных на 5 % значений модуля Юнга составляет 1,1 МПа – 3,3 %.

При изменении материальных параметров на 10% наблюдается близкая к линейной зави-

симось изменения максимальных значений температуры и напряжения (табл. 3).



**Рис. 2.** График изменения температуры вдоль контрольных линий LX (а) и LY (б) при изменении плотности материала: линия 1 – основное значение, линия 2 – + 5%, линия 3 – - 5 %.

Для уточнения модели был проведен ряд точечных экспериментов с одновременной вариацией нескольких материальных параметров с целью выявления эффектов взаимодействия. Значения изменения температур и напряжений совпадают с рассчитанным суммарным значением изменения напряжений и температур с точностью до 0,1 %. Следовательно, можно сделать вывод об отсутствии взаимного влияния изменения параметров на результаты моделирования.

Таким образом, можно провести линейную оценку максимальных температур и напряжений для широкого набора материальных параметров, основываясь на однофакторных расчетах для отдельных параметров. С помощью ме-

тогда наименьших квадратов были получены следующие формулы для относительного изменения максимальных температуры ( $\delta T$ ) и напряжения ( $\delta S$ ) и ширины ЗТВ ( $\delta H$ ):

$$\begin{aligned} \delta T &= 0,32 \cdot \delta c + 0,312 \cdot \delta \rho + 0,288 \cdot \delta \lambda, \\ \delta S &= 0,7 \cdot \delta E + 0,7 \cdot \delta \alpha + 0,494 \cdot \delta \lambda + \\ &+ 0,432 \cdot \delta \rho + 0,424 \cdot \delta c + 0,0824 \cdot \delta v, \\ \delta H &= 0,896 \cdot \delta \lambda + 0,856 \cdot \delta \rho + 0,348 \cdot \delta \alpha, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\delta$  – относительное изменение величины, %.

Таблица 3

**Процентное изменение показателей температуры и напряжения вдоль осей LX и LY при изменении каждого фактора на 10 %**

		Относительное изменение показателей*, %				Ширина ЗТВ
		Макс. значение температуры вдоль контр. линий		Макс. значение напряжения вдоль контр. линий		
		LX	LY	LX	LY	
Варьируемые параметры	c	<b>3,1</b>	<b>2,6</b>	4,1	4,5	< 0,1
	$\rho$	<b>3,1</b>	<b>2,6</b>	4,1	4,5	<b>8,5</b>
	$\lambda$	2,8	2,3	4,7	4,5	<b>8,3</b>
	E	< 0,1	< 0,1	<b>7,1</b>	<b>8,3</b>	3
	$\alpha$	< 0,1	< 0,1	<b>7,1</b>	<b>8,3</b>	< 0,1
	v	< 0,1	< 0,3	0,88	2,3	< 0,1

\*полу жирным шрифтом выделены значения для наиболее влияющих параметров

Были проанализированы физические свойства материала, полученные экспериментально, а также приведенные в статьях [8, 9], содержащих данные по титановому сплаву ВТ6 и его зарубежным аналогам.

Максимальный разброс данных для модуля Юнга составляет 23,92 %, для коэффициента Пуассона – 9,6 %, для коэффициента удельного теплового расширения – 8,15 %, для коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости – 21 и 8,57 % соответственно. Плотность материала во всех источниках одинакова. Следовательно, в предположении о линейной зависимости результатов моделирования от изменения материальных параметров по формулам (2) получаем следующие возможные отклонения максимальных значений температуры и напряжения и ширины ЗТВ для рассматриваемой модели:

$$\delta T \approx 8,79 \%, \delta S \approx 37,25 \%, \delta H \approx 21,65 \%$$

Следовательно, для момента времени 0,2 с после начала движения возможный диапазон максимальной температуры достигает 52 К, максимальных напряжений – 126 МПа, ширины ЗТВ – 0,39 мм. При этом наибольший вклад в изменение температуры и ширины зоны термического влияния вносит коэффициент теплопроводности. Для изменения поля напряжений наиболее существенным оказалось влияние модуля Юнга.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы показано, что наибольшее влияние на численную модель упругой стадии процесса ЛСТ оказывают материальные параметры: плотность, удельная теплоемкость (на температурное поле), модуль Юнга и коэффициент удельного теплового расширения (на поле напряжений).

Зависимость выходных параметров модели от входных (свойств материала) носит линейный характер, следовательно, с помощью масштабирования можно перенести результаты моделирования на модель упругой стадии процесса ЛСТ образцов со схожими свойствами материала.

Была проведена оценка степени влияния погрешности задания параметров исследуемой модели. Было показано, что задание коэффициента Пуассона постоянной величиной является целесообразным, так как данный параметр незначительно влияет на чувствительность модели. Однако задание плотности как постоянной величины может привести к существенной потере точности при моделировании. Необходимо исследовать зависимость плотности от температуры, так как ее вариация существенно влияет на результаты моделирования.

На основе расширенной модели планируется провести аналогичные исследования с учетом пластической стадии процесса ЛСТ для различных моделей пластических деформаций.

В работе [10] показано, что структурный  $\alpha$ - $\beta$ -переход в титановом сплаве ВТ6 может оказать существенное влияние на поля напряжений и температур, поэтому необходимо его учитывать, например, с помощью задания энтальпии. Это планируется добавить в расширенную компьютерную модель и определить чувствительность полученной модели к материальным параметрам, в частности, к значению температуры фазового перехода.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vairis A., Frost M.** On the extrusion stage of linear friction welding of Ti6Al4V // *Material Science and Engineering*. 1999. A 271. P. 477–484.
2. **Вилль В. И.** Сварка металлов трением. Л.: Машиностроение, 1970. 176 с.
3. **Ямилева А. М., Насибуллаев И. Ш.** Двухпараметрическая модель упругой стадии процесса линейной сварки трением в пакете ANSYS Mechanical // *Материалы V Всероссийск. науч.-техн. конф. молодых специалистов: Уфимск. моторостр. произв. объединение*. Уфа, 2011. С. 82–84.
4. ГОСТ 19807-91: Титановый сплав ВТ6
5. **Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М.** Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. 712 с.
6. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика в 10 т. Т. VII Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.
7. Характеристика материала ВТ6 // *Марочник стали и сплавов [Электронный ресурс]* ([http://www.splav.kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=1298](http://www.splav.kharkov.com/mat_start.php?name_id=1298)).
8. High temperature stress assessment in SCS-6/Ti-6Al-4V composite using neutron diffraction and finite element modeling / P. Rangaswam [et al.] // *J. of Mater. Proc. Tech*, 2001.
9. **Wen-Ya Li, Tiejun Ma, Jinglong Li.** Numerical simulation of linear friction welding of titanium alloy // *Effects of processing parameters*. 2010. P. 1499–1450.
10. FEM simulation of the linear friction welding of titanium alloys / J. Sorina-Müller [et al.] // *J. Computational Materials Science*. 2010. № 48. P. 749–758.

### ОБ АВТОРАХ

**Чукалова Анастасия Олеговна**, студ. спец. «Прикладная математика». Иссл. в обл. моделирования процессов механики.

**Ямилева Альфия Маратовна**, асп. каф. высокопроизводительн. вычислительн. технологий и систем. Дипл. инженер-математик (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. моделирования твердотельных процессов.

**Насибуллаев Ильдар Шамилович**, ст. преп. той же каф. Дипл. спец. по теор. и вычислительн. физике (БГУ, 2000). Канд. физ.-мат. наук по физике конденсированного состояния (Ин-т физики молекул и кристаллов УНЦ РАН, 2005). Иссл. в обл. гидродинамики изотропных и анизотропных жидкостей.

**Ваирис Ахиллефс**, проф. Критск. технологическ. ин-та. Дипл. магистр-инженер в обл. механики (Бристоль, 1988). PhD в области механики (Бристоль, 1998). Иссл. в обл. экспериментального и математического моделирования процессов сварки трением.