

А. М. Ямилева, А. Ю. Медведев, И. Ш. Насибуллаев, И. В. Александров, А. Ваирис

## ПОСТРОЕНИЕ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЛИНЕЙНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С УЧЕТОМ ЭТАПА ПРОКОВКИ

В данной работе проводится построение двумерной компьютерной модели процесса линейной сварки трением (ЛСТ) в инженерном пакете ANSYS Mechanical. Для верификации модели используются экспериментальные данные: зависимость осадки образцов от времени при ЛСТ, полученная из записей системы PDS для линейной сварки трением прямоугольных образцов, и ширина зоны пластических деформаций, полученная в результате микроструктурного анализа сваренных образцов. *Линейная сварка трением; компьютерное моделирование; ANSYS Mechanical*

Современное развитие авиационной промышленности требует разработки новых технологий для создания газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения, обладающих большей тягой на килограмм веса, что может быть достигнуто существенным уменьшением удельного веса двигателя. В частности, одним из решений получения облегченной конструкции узлов ГТД является использование технологии линейной сварки трением при производстве моноколес ГТД для «наращивания» деталей вместо фрезерования из цельной заготовки, а также в ремонтном производстве для замены отдельных элементов моноколеса.

Линейная сварка трением (ЛСТ) является разновидностью сварки трением [1, 2], при которой неразъемное соединение свариваемых частей образуется вследствие их сжатия до образования плотного контакта и возвратно-поступательного движения друг относительно друга. Под действием сил трения происходит выделение тепла в зоне контакта поверхностей, благодаря чему происходит пластификация тонких слоев материала, прилегающих к линии стыка. Происходит осевое укорачивание вследствие вытеснения пластичного материала из зо-

ны контакта, образующего так называемый грат. На завершающей стадии процесса механическое движение завершается, прикладывается дополнительное давление (проковка) для образования сварного соединения.

Известно, что разработка компьютерной модели на основе ограниченного количества физических экспериментов позволяет значительно снизить количество дорогостоящих экспериментов, заменяя их проведение численным моделированием на суперкомпьютере. В частности, адекватная компьютерная модель процесса ЛСТ позволит определять зону термического влияния, что особенно важно при соединении разнородных материалов.

Целью данной работы является построение адекватной компьютерной модели процесса ЛСТ, которая бы хорошо согласовалась с имеющимися экспериментальными данными, а именно динамикой осадки и шириной зоны пластической деформации.

Показано, что для построения полной модели процесса ЛСТ достаточно трех подгоночных параметров, при этом целевыми функциями являются зависимость осадки от времени и ширина пластической зоны.

### 1. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ В ПАКЕТЕ ANSYS MECHANICAL

В рамках линейной сварки трением процесса происходит несколько физических явлений:

- нагрев и остывание (используются законы термодинамики);
- упругопластические деформации (используются законы теории упругости и теории пластичности).

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».

Математическое моделирование этого процесса представляет собой моделирование каждого из этих явлений, а также связей между ними.

Связь между законами механики и термодинамики реализуется с помощью двух механизмов. Во-первых, при деформировании тела, сопровождающемся изменением температуры (как вследствие внешнего нагрева, так и в результате самой деформации), происходят деформации – объемное расширение материала.

Во-вторых, связь реализуется через внешний источник тепла  $f_{fr}$  в уравнении теплопроводности, характеризующий тепловыделение за счет трения.

Закон трения выберем в форме Амонтона-Кулона:

$$\tau_{fr} = \lambda(T)P_n,$$

где  $\tau_{fr}$  – эквивалентное сдвиговое напряжение,  $\lambda(T)$  – коэффициент трения, зависящий от температуры,  $P_n$  – нормальное давление в плоскости трения (давление реакции опоры). Тогда внешний источник тепла определяется формулой:

$$f_{fr} = k_f \tau_{fr} v, \quad (1)$$

где  $k_f$  – доля рассеянной при трении энергии, переводимой в тепло,  $v$  – скорость скольжения.

В-третьих, вследствие пластических деформаций происходит нагрев материала в области контакта.

Основной сложностью построения компьютерной модели процесса ЛСТ является моделирование больших пластических деформаций и образование грата. На данный момент современные инженерные пакеты, в том числе и ANSYS Mechanical, не позволяют получить адекватную модель образования грата, так как при ЛСТ возникают значительные пластические деформации в узком приконтактном слое: толщина грата составляет 1–2 мм, а длина может достигать 30 мм (для рассматриваемых размеров образцов). Кроме того, расчет значительных пластических деформаций занимает существенное время.

В работе [3] опробована модель термоупругих деформаций двух образцов при трении с удалением слоя материала, уходящего в грат, в области контакта образцов по некоторому критерию; удаление слоя материала представляет собой перенос поля температуры на заданную толщину без фактического удаления конечных элементов и изменения поля напряже-

ний, что позволяет использовать конечно-элементную сетку, плотную только в зоне контакта и существенно сократить время расчета.

В данной работе для моделирования динамической стадии процесса (нагрев вследствие скольжения образца с трением) также применен метод удаления слоя материала в области контакта для имитации образования грата. В ходе моделирования для каждого образца проводится анализ полей напряжений и температур и определение толщины слоя материала, достигшего предела текучести. Затем, имитируя выдавливание материала в грат, часть пластического слоя удаляется, и расчет продолжается.

В отличие от модели, представленной в работе [3], где минимальная толщина удаляемого слоя не может быть меньше размера элемента, в разработанной модели возможно удаление материала произвольной толщины без привязки к конечно-элементной сетке.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается двумерная компьютерная модель динамической фазы процесса ЛСТ в инженерном пакете ANSYS Mechanical. Геометрия представляет собой два образца прямоугольного сечения размером  $26 \times 5$  мм (рис. 1).

В модели материала используются параметры титанового сплава ВТ6 [4], взятые из библиотеки материалов инженерного пакета Deform-3D. Рассматривается изотропная упругая модель материала. Коэффициент трения  $\lambda(T)$  до значения температуры 893 К задан в линейном виде:

$$\lambda(T) = 0,3 + 5 \cdot 10^{-4} (T - 293),$$

а при температуре, превышающей 893 К, остается постоянным, равным 0,6.

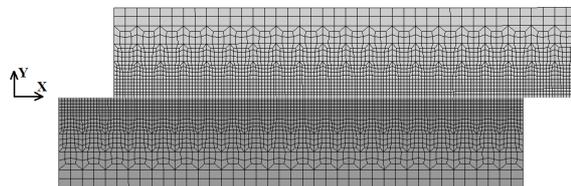


Рис. 1. Конечно-элементная модель

Граничные условия заданы в соответствии с нагрузками в системе PDS (Progress Development System) для линейной сварки трением прямоугольных образцов, установленной на ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение».

В модели выделены две фазы процесса ЛСТ: динамическая и завершающая. На динамической фазе:

- нижний образец движется горизонтально (вдоль оси X) по периодическому закону  $x = a \cdot \sin(2\pi ft)$  с амплитудой  $a$ , возрастающей линейно от 0 до 2 мм за 0,1 с, и частотой  $f = 50$  Гц;

- нижняя грань нижнего образца зафиксирована по вертикали (вдоль оси Y), верхняя грань верхнего образца – по горизонтали (вдоль оси X);

- на верхнюю грань верхнего образца задано давление, соответствующее прижимному усилию, возрастающему от 15 кН до 35 кН со скоростью 200 кН/с.

Начальная температура образцов однородна и равна 293 К. Процесс считается адиабатическим вследствие малой продолжительности динамической фазы – порядка 1 с.

Расчет динамической фазы не ограничен по времени и продолжается до достижения конечного значения осадки образцов 2,9 мм.

Затем реализуется завершающая стадия процесса, где:

- нижняя грань нижнего образца жестко закреплена, верхняя грань верхнего образца зафиксирована по горизонтали (вдоль оси X);

- на верхнюю грань верхнего образца в течение 12 с действует проковочное давление, соответствующее прижимному усилию 35 кН, которое затем снижается до 0 со скоростью 200 кН/с;

- на всех гранях образца задан конвективный теплообмен с окружающей средой, коэффициент теплообмена взят 50 Вт/(м<sup>2</sup>К), температура окружающей среды – 293 К (комнатная температура).

Здесь используется упруго-пластическая модель материала критерием текучести по Мизесу, ассоциативным законом течения и кинематическим (трансляционным) линейным законом упрочнения [5]. В модели задаются лишь два параметра: предел текучести и модуль упрочнения, зависящие от температуры.

Расчет завершающей фазы продолжается до полного остывания образцов – около 800 с.

## 2. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАНЫМИ

Для обеспечения адекватности модели необходимо сравнить результаты моделирования

с экспериментальными данными. В качестве целевых параметров, по значению которых проводится сравнение с экспериментальными данными, были выбраны зависимость осадки образцов от времени, записанная с установки PDS, и суммарная ширина зоны пластической деформации образцов, определенная в ходе микроструктурного анализа [6].

Для отладки модели по экспериментальным данным были введены следующие параметры: доля энергии, выделяющейся при трении, переходящей в тепло ( $k_f$ , см. формулу (1)), и на удаление шероховатостей, перестройку микроструктуры и т. д. ( $1 - k_f$ ), доля пластической зоны, удаляемая в грат ( $k_d$ ) и переходящая в пластический слой ( $1 - k_d$ ).

Так как в рассматриваемой модели пластические деформации (и тепловыделение при них) не моделируются, а тепловыделение при пластическом трении отличается от тепловыделения в упругой стадии, для учета различий в тепловых источниках коэффициент  $k_f$  определяется отдельно для упругой и пластической стадий процесса:  $k_{fe}$  и  $k_{fp}$  соответственно. Следовательно, в модели используются три подгоночных параметра.

Для простоты параметры  $k_{fe}$  и  $k_{fp}$  варьируются последовательно и независимо. Для этого в графике осадки выделяются два целевых параметра: длительность  $t_s$  процесса до начала осадки – для упругой стадии процесса, и угол  $\alpha$  наклона линейной части графика осадки – для пластической стадии процесса (рис. 2). В этом случае независимая вариация параметров  $k_{fe}$  и  $k_{fp}$  является обоснованной вследствие разбиения задачи на две последовательные подзадачи (упругая и пластическая стадии процесса) с отдельными целевыми параметрами.

При этом параметр  $k_d$  фиксирован, его значение составляет 4,4 % согласно проведенной теоретической оценке по известной скорости осадки и ширине пластической зоны.

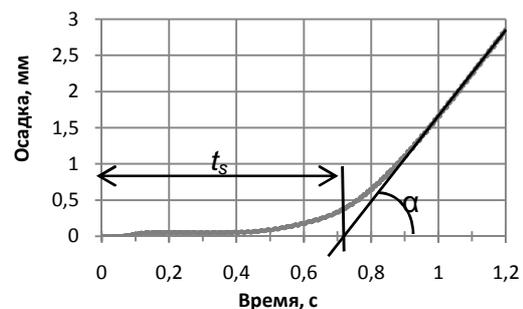


Рис. 2. Целевые параметры модели, определяемые по графику осадки

При вариации параметра  $k_{fe}$  проводится сравнение  $t_s$  со значением, полученным из экспериментальных данных, равным  $0,708 \pm 0,06$  сек. При вариации параметра  $k_{fp}$  достигается совпадение  $\text{tg } \alpha$  со значением  $6,08 \pm 0,15$ . Для полученных значений (табл. 1) была проведена квадратичная аппроксимация методом наименьших квадратов и выведены формулы для определения параметров:

$$\begin{aligned} k_{fe} &= 3,3454t_s^2 - 4,6945t_s + 1,9434; \\ k_{fp} &= 0,0223(\text{tg } \alpha)^2 - 0,1755 \text{tg } \alpha + 0,7145. \end{aligned} \quad (2)$$

При значениях параметров  $k_{fe} = 30\%$  и  $k_{fp} = 47\%$ , определенных по формулам (2), наблюдается хорошее согласие графика осадки, полученного при моделировании, с определенным экспериментально.

При этом ширина пластической зоны  $h$  составляет 1,37 мм, что отличается от экспериментального значения 1,25 мм. Поэтому была проведена вариация параметра  $k_d$  в диапазоне 4,4 – 5,2% с шагом 0,4% (табл. 1).

Таблица 1

## Результаты вычислительного эксперимента

$k_{fe}, \%$	$t_s, \text{сек}$	$k_{fp}, \%$	$\text{tg } \alpha$	$k_d, \%$	$h, \text{мм}$
90	0,275	100	8,82	4,4	1,37
70	0,36	80	8,8	4,8	1,27
50	0,45	60	7,13	5,2	1,20
30	0,73	40	5,11		

В результате квадратичной аппроксимации было получено:

$$k_d = 10,084h^2 - 30,622h + 27,425, \quad (3)$$

откуда было определено искомое значение – 4,9 %.

Вследствие небольшой величины диапазона варьирования формулы для определения параметров  $k_{fe}$  и  $k_{fp}$  остались адекватными, так как значения целевых функций изменились незначительно – 0,01 с для  $t_s$ , 0,11 для  $\text{tg } \alpha$ , что в пределах погрешности, заданной экспериментальными данными (0,06 с для  $t_s$ , 0,15 для  $\text{tg } \alpha$ ).

Таким образом, определены значения параметров, при которых достигается согласие с экспериментальными данными. Доля энергии, выделяющейся при трении, переходящей в тепло,  $k_f$  до начала осадки составляет 30 %, в пластической стадии процесса – 49 %. В грат удаляется 4,9 % от текущей ширины пластической зоны.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 представлены результаты моделирования в виде зависимости осадки от времени. В тех же координатах представлены экспериментальные данные. Расхождение в значениях составляет не более 5,9 % для линейной части графика осадки.

Анализ микроструктуры образцов сплава ВТ6 после линейной сварки трением в области контакта двух материалов показал, что суммарная ширина зоны пластической деформации составляет 1,25 мм для величины осадки 2,9 мм. Полученная при моделировании конечная ширина зоны пластической деформации для величины осадки 2,9 мм составила 1,27 мм (рис. 3), что составляет расхождение с экспериментальным значением 1,6 %.

Компьютерная модель показала хорошее количественное согласие с экспериментальными данными, что позволяет использовать эту модель при моделировании процесса ЛСТ с другими значениями технологических факторов процесса, таких как амплитуда, частота и прижимная сила для рассматриваемого материала ВТ6.

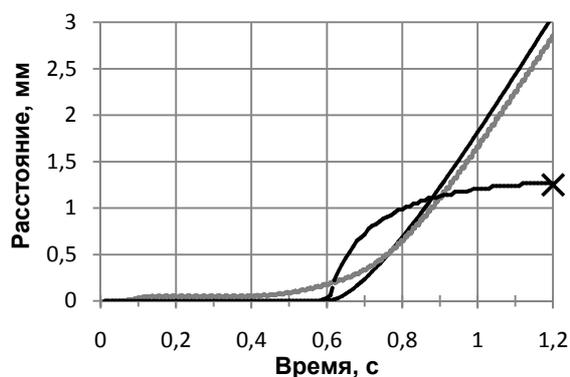
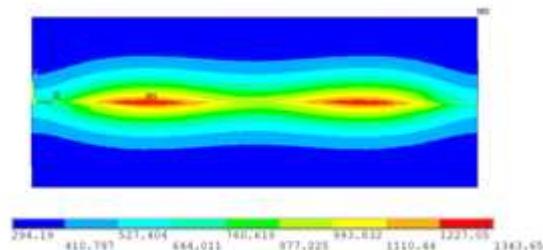


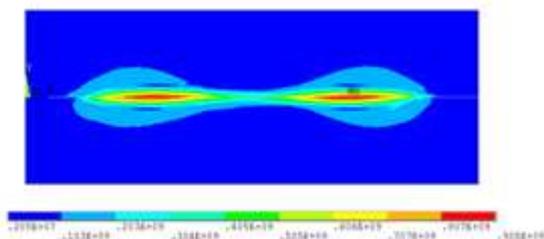
Рис. 3. Зависимость величины осадки, полученная экспериментально (—) и при моделировании (---) и ширины пластической зоны, полученная в эксперименте (×) и при моделировании (--) от времени

На рис. 4 приведен профиль температуры на образцах через 1,2 с после начала движения, полученный в результате моделирования. Максимальная температура наблюдается в двух точках на линии контакта и составляет около 1345 К. Температура фазового перехода для ВТ6 составляет 1210–1245 К, следовательно, для рассматриваемой модели зона фазового перехода представляет собой две области толщиной около 0,2 мм.



**Рис. 4.** Температурное поле после динамической фазы процесса

После проковки были получены остаточные напряжения (рис. 5). Они локализируются в области максимального значения температур в области контакта. Максимальное значение остаточных напряжений составляет 900 МПа.



**Рис. 5.** Поле остаточных напряжений после полного остывания образцов

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных данных (величина осадки и ширина пластической зоны) была построена компьютерная модель динамической фазы процесса ЛСТ в пакете ANSYS Mechanical. В работе был определен набор параметров, который позволил получить хорошее количественное согласие с экспериментом.

В дальнейшем планируется провести полный факторный эксперимент для различных технологических параметров процесса для получения параметров модели, при которых достигается полное согласие с экспериментальными данными. Тогда построенная модель может быть использована для подбора необходимых значений осадки и ширины пластической зоны.

Необходимо уточнить полученные результаты для других материалов.

Кроме того, планируется рассмотреть другие модели пластичности и определить наиболее адекватно отражающую поведение материала в процессе ЛСТ, а также учесть в модели фазовый переход.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вилль В. И.** Сварка металлов трением. Л.: Машиностроение, 1970. 175 с.
2. **Vairis A., Frost M.** On the extrusion stage of linear friction welding of Ti6Al4V // *Material Science and Engineering*. 1999. A 271. P. 477–484.
3. FEM simulation of the linear friction welding of titanium alloys / J. Sorina-Müller [et al.] // *J. Computational Materials Science*. 2010. 48. P. 749–758.
4. ГОСТ 19807-91: Титановый сплав ВТ6
5. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. ANSYS Inc., Release 14.0, 2011.
6. Влияние величины осадки на формирование сварного соединения при линейной сварке трением / М. В. Караваева [и др.] // *Письма о материалах*. 2012. Т. 2. С. 40–44.

### ОБ АВТОРАХ

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

**Медведев Александр Юрьевич**, доц. каф. оборудования и технологии сварочн. производства. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Тольяттинск. гос. ун-т, 2003). Иссл. в обл. моделирования нагрева при сварке, аргонодуговой сварки, сварки трением.

**Насибуллаев Ильдар Шамилович**, ст. преп. каф. высокопроизводительн. вычислительн. технологий и систем. 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.

**Александров Игорь Васильевич**, проф., гл. науч. сотр., зав. каф. физики. Дипл. физик (БГУ, 1976). Д-р физ.-мат. наук по физике твердого тела (ИФМ УрНЦ РАН, 1997). Иссл. в обл. физики прочности и пластичности материалов.

**Вайрис 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.