

Моделирование процесса линейной сварки трением в пакетах компьютерного моделирования

Р.К. Газизов, В.Ю. Иванов, А.А. Касаткин, С.Ю. Лукашук,
И.Ш. Насибуллаев, А.М. Ямилева,

Исследуется возможность использования пакетов ANSYS Multiphysics и LS-DYNA для моделирования процесса нагрева и деформации двух образцов при их взаимном трении с большой прижимной силой. Получены зависимости распределения температуры и напряжений в образцах от времени, а также появление пластических деформаций образца в зависимости от начальных условий и режимов. Проведена оценка эффективности параллельных вычислений на пакетах для рассматриваемой задачи.

1. Введение

Сварка трением – это разновидность сварки давлением, при которой нагрев осуществляется трением, вызванным перемещением друг относительно друга соединяемых частей свариваемого изделия [1].

Математическое моделирование процессов сварки трением представляет собой нетривиальную задачу из-за сложности и высокой интенсивности физико-химических процессов, сопровождающих сварку. Процесс линейной сварки трением является относительно новым и еще слабо проработан с точки зрения математического моделирования. Также представляется важным вопрос о возможности использования для моделирования ЛСТ стандартных инженерных пакетов компьютерного моделирования, таких как Ansys Multiphysics и LS-DYNA. В силу сложности процесса сварки трением, объем вычислительных ресурсов, необходимых для проведения моделирования, оказывается достаточно большим, что приводит к необходимости использования многоядерных и многопроцессорных вычислительных систем.

2. Теоретическая часть

Процесс сварки трением связывает три основных группы процессов. В результате нагружения (за счет зажима образцов и их взаимодействия друг с другом) в образце возникают напряжения, приводящие к *упругим деформациям*. Трение приводит к *тепловыделению* и теплопереносу. Часть образца, подвергнутая сильному нагреву, становится пластичной, и большие нагрузки приводят к сильной *пластической деформации*. Стоит отметить, что все эти процессы взаимосвязаны, поэтому рассмотрим каждый из этих процессов и их взаимосвязь.

В процессе сварки условно можно выделить три области по типу деформации (начиная от границы контакта): область с пластической деформацией, область с упруго-пластической деформацией и область с упругой деформацией.

Нами моделировался второй этап линейной сварки трением. Для решения данной задачи мы использовали комбинацию двух пакетов — ANSYS и LS-DYNA. Оба пакета (ANSYS и LS-DYNA) поддерживают режим параллельных вычислений, что позволяет использовать их на кластерных системах.

Вначале были проанализированы наиболее важные для моделирования процесса линейной сварки трением факторы:

1. Из-за высоких механических нагрузок (прижимное усилие образцов при сварке) приводит к появлению больших напряжений;

2. Скорость нагрева в результате трения является высокой (порядка 700К за 1 сек.), что приводит к появлению больших градиентов температур (нагрев происходит значительно быстрее, чем перераспределение тепла за счет теплопроводности образца);

3. Задача является трехмерной и единственной симметрией является зеркальная симметрия относительно вертикальной плоскости параллельной направлению движения образцов, что позволяет уменьшить количество элементов только вдвое. Расчет нельзя свести к плоской задаче.

Это означает, что моделирование необходимо проводить на мелкой трехмерной сетке (с большим количеством элементов) и шаг по времени должен быть мал (большое количество интервалов для небольшого промежутка времени).

Для моделирования данной задачи необходима большая вычислительная мощность и значительный объем оперативной памяти, что нереализуемо на базе обычных ПК. Поэтому при расчете необходимо применение суперкомпьютерных технологий.

Дополнительный модуль параллельных вычислений Parallel Performance for ANSYS позволяет решать большие задачи на кластерах вычислительных станций и на многопроцессорных станциях. На данный момент доступно четыре решателя для распределенных вычислений:

- DPCG - предопределенных сопряженных градиентов
- DJCG - сопряженных градиентов Якоби
- DDS - Distributed Domain Solver
- AMG - алгебраический многосеточный

Многопоточная версия поддерживает также точный метод Sparse, PCG – предобусловленный метод сопряженных градиентов, ICCG – метод сопряженных градиентов с использованием неполного разложения Холецкого.

Геометрическая модель состоит из двух одинаковых брусков, стоящих один на другом. Размеры брусков: 26мм×13мм×13мм.

Верхний брусок скользит по поверхности нижнего вдоль длинной стороны, нижний брусок неподвижен. В данной задаче в качестве объемного элемента мы используем 3D 20-ти узловой тип элемента SOLID 226. Этот выбор обусловлен тем, что данный тип элемента – единственный 3D 20-ти узловой тип, имеющий в наборе степеней свобод температуру и вектор перемещений и, таким образом, поддерживающий структурно-термический анализ.

Для задания параметров скольжения между брусками создается контакт. Тип контакта – закрытый и скользящий, без взаимного проникновения. В пакете используется модель трения Кулона. Коэффициент трения взят 0.2. В качестве элементов контакта используются элементы 3D 8-ми узловой контакт CONTA 174 для движущейся поверхности и 3D сегмент TARGE170 для неподвижной поверхности.

CONTA 174 используется для представления контакта и скольжения между 3D ответными поверхностями и деформируемой поверхностью. Этот элемент имеет те же характеристики, что и грань твердого тела, с которой он соединяется (SOLID 226). Данный элемент допускает кулоновское трение. Он нелинеен и допускает большие деформации, а также тепловыделение при трении. Элемент задается восемью узлами (лежащий в основе твердотельный элемент имеет срединные узлы), следовательно, это единственный подходящий тип контакта для элемента SOLID 226.

TARGE170 используется для представления различных 3D «ответных» поверхностей, связываемых с контактными элементами (в данном случае с CONTA 174). Данная ответная поверхность разложена на набор ответных элементов (TARGE170), и составляет пару соответствующей ей контактной поверхности через совместный набор реальных констант.

Рассматривается адиабатический процесс (замкнутая система), то есть теплопередача во внешнюю среду и излучение не учитывается. Это обосновано тем, что процесс происходит за очень маленький промежуток времени (0.5-1 с). Нижний брусок фиксируется своей нижней гранью. На верхний брусок фиксации не наложено, но все его точки движутся по периодическому закону $x = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$ с амплитудой $A = 2\text{мм}$, частотой $f = 50\text{Гц}$.

На верхний брусок также действует объемная прижимная сила около 35кН, равномерно распределенная между его узлами.

Мы брали упрощенные свойства и параметры материала, т.к. для приблизительной оценки их можно не учитывать. Нами рассматривался изотропный упругий материал. В модель не вводится пластичность материала, т.к. в данной модели мы рассматриваем процесс трения до наступления пластических деформаций.

В качестве материала рассматривался Ti6Al4V. При этом в модели не учитывался α - β переход. Также не учитывались температурные зависимости параметров материала. В дальнейшем предполагается учесть эти моменты.

Значения параметров, используемые в модели, приведены в таблице 2.1 (см. [2])

Таблица 2.1

Свойство	Значение
Плотность	4.42 г/см ³
Коэффициент теплопроводности	6.6 Вт м ⁻¹ К ⁻¹
Удельная теплоемкость	0.580 Дж м ⁻¹ К ⁻¹
Модуль Юнга	100 ГПа
Коэффициент Пуассона	0.31

Для данной модели строилась неравномерная сетка с элементами типа «параллелепипед». Также учитывалась симметрия вдоль направления движения.

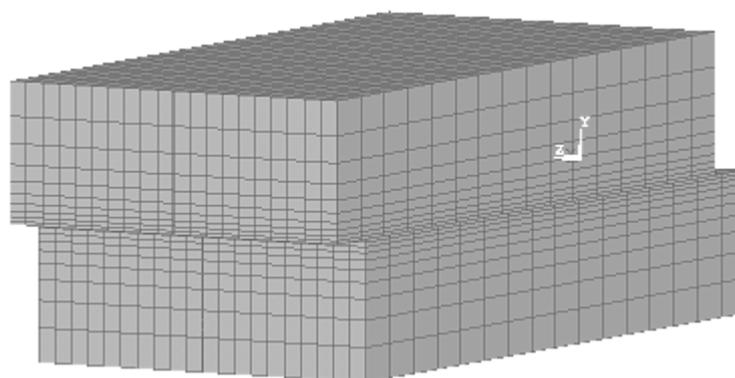


Рис. 1. Конечно-элементная сетка

Так как нагрев происходит в тонком приконтактном слое, то целесообразным явилось задание неравномерной сетки по вертикали, уплотняющейся в области контакта. Таким образом, более подробно рассматривается тот участок модели, который нас больше всего интересует.

3. Результаты моделирования в ANSYS

Описанная выше модель рассчитывалась на суперкомпьютере УГАТУ с использованием пакета ANSYS Multiphysics. Суперкомпьютер УГАТУ построен на базе блейд-серверов IBM BladeCenter HS21 и содержит 266 узлов (19 блейд-центров, по 14 узлов в каждом). Каждый узел содержит два четырехъядерных процессора Intel Xeon 5300 2.33 ГГц и 8 Гб оперативной памяти. Вычислительная коммуникационная среда – Infiniband (10 Гбит/с). Пиковая производительность составляет 19.8 TFlops, по Linpack – 15.33 TFlops, система установлена в 2007 г. и находится на пятой позиции рейтинга Top50 (на сентябрь 2009).

Была выбрана сетка с неравномерным шагом по вертикальной оси и равномерным в горизонтальной плоскости. Общее число элементов составило 3520 (15756 узлов). Шаг по времени также был взят малым: выполнялось 1000 шагов по 0.0005 с. На данной сетке был проведен предварительный комбинированный расчет поля напряжений и поля температур в зависимости от времени.

На рис. 2 показано итоговое распределение температуры по основным направлениям.

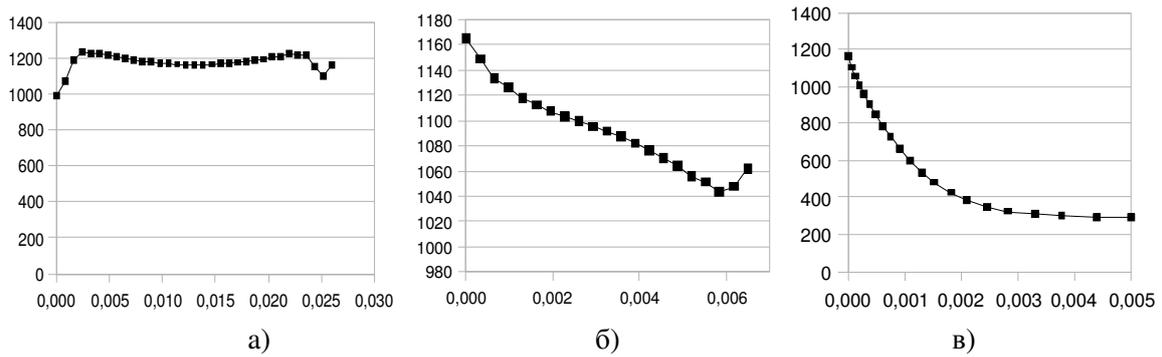


Рис. 2. Распределение температур в горизонтальной плоскости вдоль движения (а), перпендикулярно направлению движения (б) (половина образца) и по вертикали (в)

Результаты расчетов поля температур и поля напряжений в конечный момент времени ($t=0.5$ сек) представлены на рис. 3.

Температура вблизи плоскости контакта в результате трения образцов возрастает от комнатной до 953 С. Распределение температур в плоскости xOz останется более или менее равномерной в области постоянного контакта и снижается на концах образца вдоль оси движения из-за непостоянного контакта этих областей.

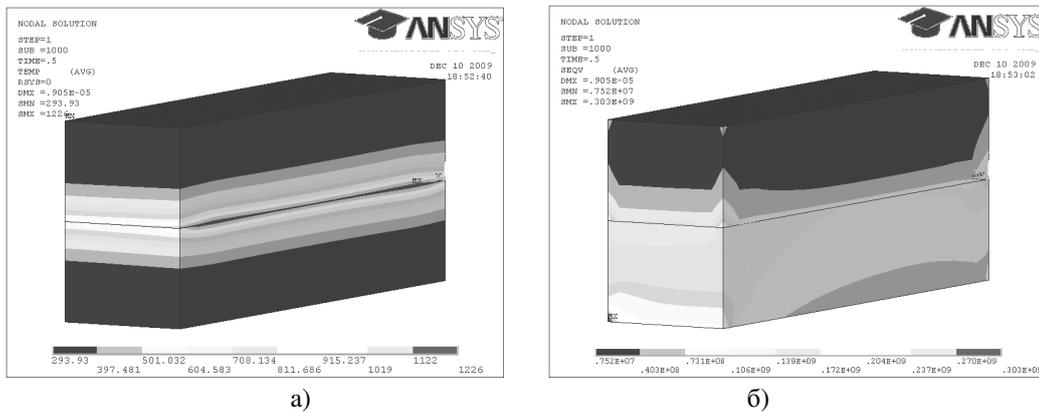


Рис. 3. Распределение поля температур (а) и поля напряжений (б) в конечный момент времени 0.5с

Основным результатом моделирования линейной сварки трением для второй фазы (переход от упругой деформации к пластической) является точное определение момента времени, когда появляются пластические деформации (рис. 4). Критерием является определения предела текучести – значения напряжения в элементе образца, когда появляется остаточная деформация. Предел текучести сильно зависит от температуры, что наблюдается в экспериментах по определению предела текучести (черная линия).

В процессе моделирования нами была получена зависимость напряжения от температуры в центре плоскости контакта (серая линия).

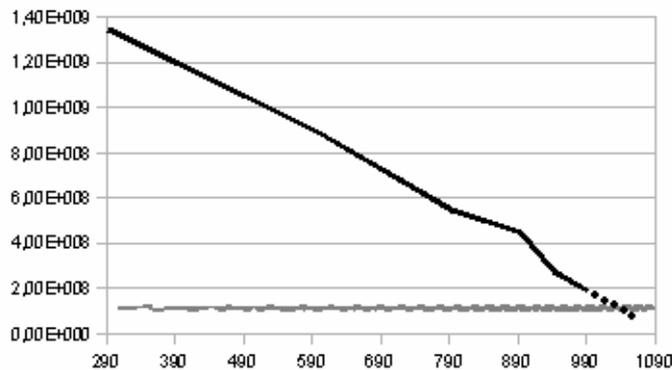


Рис. 4. Зависимость напряжения от температуры

Как видно из рисунка, предел текучести достигается в точках в плоскости контакта для температуры порядка 1040 К.

4. Расчет тестовой задачи в LS-DYNA

В процессе линейной сварки трением за счет нагрева происходит снижение предела текучести металла, в результате чего зона нагрева становится пластичной. При продолжении осцилляций происходит сокращение образцов, а часть материала выдавливается в виде флеша, конечные размеры которого сопоставимы с длиной образца. При моделировании данной фазы процесса основными требуется корректный расчет при больших деформациях конечно-элементной модели, моделирование пластического поведения материала с учетом зависимости от температуры и детальное моделирование контактного взаимодействия образцов (трение, тепловыделение).

Тип и формулировка элементов в LS-DYNA определяют способ записи уравнений метода конечных элементов. Например, плоские элементы могут участвовать не только в задаче с плоскими напряжениями, но в осесимметричной задаче, а также тонкие представлять трехмерные элементы с малой толщиной. Кроме того, возможно решение задач в Эйлеровой постановке (течение сплошной среды сквозь неподвижные ячейки) или Эйлерово-Лагранжевой (ALE – Arbitrary Lagrangian-Eulerian), которая позволяет работать с подвижной сеткой, не связанной жестко со средой.

Отдельно следует упомянуть бессеточные формулировки элементов LS-DYNA. В бессеточном метод Галеркина EFG (Element-Free Galerkin) участвующие в уравнениях переменные аппроксимируются через значения на облаке точек-узлов методом Moving Least Squares (аналог метода наименьших квадратов). При этом каждый узел оказывает влияние на некоторую область вокруг себя.

Бессеточный метод Галеркина хорошо подходит для расчета больших пластических деформаций, так как не чувствителен к искажению формы элементов. Моделирование больших деформаций при использовании обычного метода конечных элементов может обеспечиваться только путем адаптивного перестроения конечно-элементной сетки. Для EFG адаптивное перестроение сетки не обязательно, но может улучшить точность расчета за счет более равномерного расположения узлов.

Для исследования возможностей системы LS-DYNA была создана тестовая двумерная задача с изначально заданным горячим слоем металла. Размеры и параметры осцилляций выбраны аналогично модели ANSYS. В результате расчетов получена картина постепенного выдавливания пластического слоя из зоны контакта.

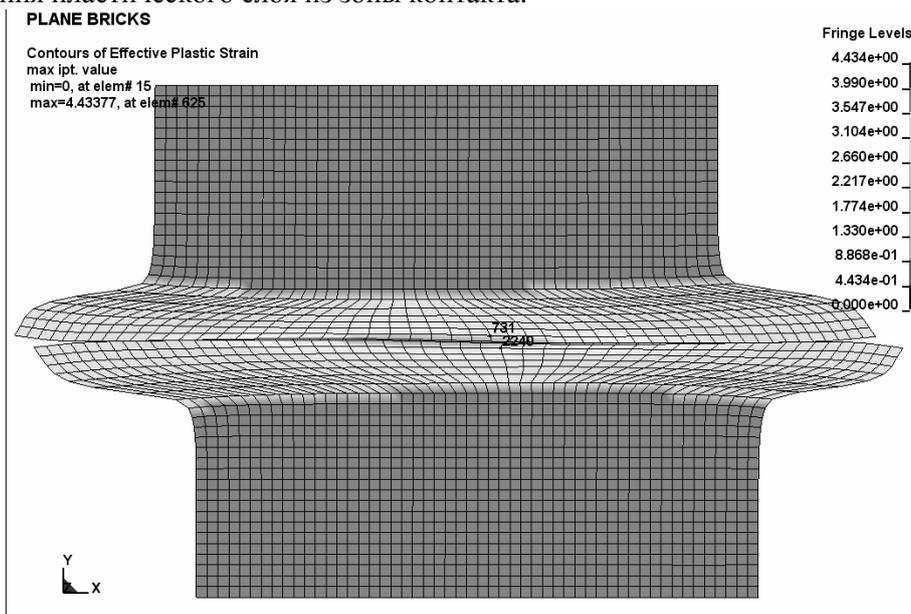


Рис. 5. Выдавливание пластического слоя

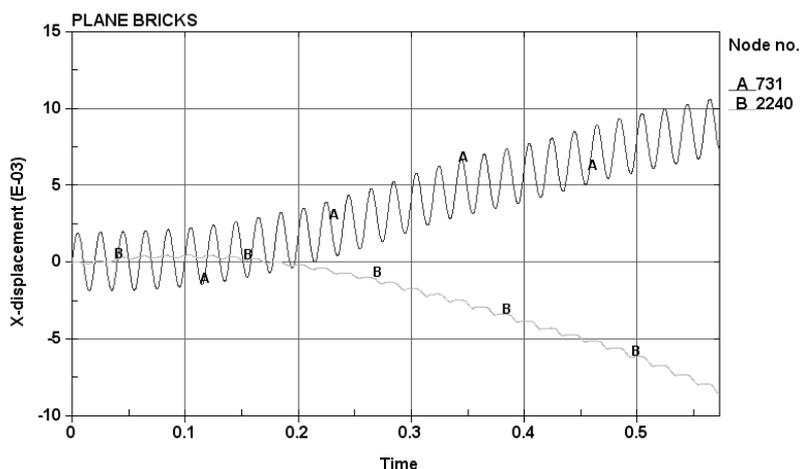


Рис. 6. Графики горизонтального смещения узлов

График А на рис. 6, соответствующий точке с верхнего бруска, отражает осцилляции всего бруска вместе с пластической деформацией, В – перемещение узла нижнего бруска.

Потенциал распараллеливания расчёта больших задач в LS-DYNA очень высок, т.к. в пакете используется явная схема, и решение системы алгебраических уравнений на каждом шаге не требуется.

5. Заключение

Проанализированы наиболее важные для моделирования процесса линейной сварки трением факторы, такие как размерность конечно-разностной сетки и симметрия задачи. Решалась трехмерная задача с равномерным распределением узлов параллельно плоскости контакта и существенно неравномерным распределением узлов сетки в направлении, перпендикулярном плоскости контакта.

Данные результаты являются предварительными. Как показали расчёты, в данной версии пакета ANSYS параллельные вычисления не всегда являются эффективными для данного класса задач. В данной задаче использовался решатель Distributed sparse, который плохо поддается распараллеливанию (ускорения при использовании нескольких ядер очень малы). Другие решатели в данной версии не поддерживают нашу задачу. Но в дальнейшем будет использоваться версия ANSYS 12.0, которая содержит множество улучшений и оптимизаций для параллельных вычислений на многоядерных и кластерных системах. Поэтому оценку эффективности параллельных вычислений предполагается проводить несколько позже. Исследуется также возможность получения аналогичных результатов и моделирования пластической деформации в пакете LS-DYNA.

Литература

1. Сварка трением: Справочник/В. К. Лебедев, И. А. Черненко, Р. Михальски и др.; Под общ. ред. В. К. Лебедева, И. А. Черненко, В. И. Билля. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1987. – 236 с.
2. Vanderhasten M. Ti-6Al-4V: Deformation map and modelisation of tensile behavior // PhD Thesis. – Royal Military Academy, 2007. – 150 pp.
3. Vairis A. and Frost M. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti 6Al 4V // Mater. Sci. Eng., 1999, vol. A271. – pp. 477-484.
4. Release 11.0 Documentation for ANSYS.
5. LS-DYNA Version 970 Keyword User's Manual.