

Анализ эффективности распараллеливания решателей пакета ANSYS Multiphysics при моделировании термopрочностных задач в процессах линейной сварки трением

А.Т. Бикмеев¹, Р.К. Газизов¹, В.Ю. Иванов², А.А. Касаткин¹, В.В. Латыш³,
С.Ю. Лукашук¹, И.Ш. Насибуллаев¹, К.Р. Юлмухаметов¹, А.М. Ямилева¹

Уфимский государственный авиационный технический университет¹,
Уфимское моторостроительное производственное объединение²,
ГУП Научное конструкторско-технологическое бюро «Искра»³

Особенностью процесса линейной сварки трением (ЛСТ) является быстротечность процесса, сопровождаемая большими градиентами температуры и напряжений. Моделирование этого процесса в пакете ANSYS Multiphysics требует использование конечных элементов малого размера, а также малого шага по времени, что, в свою очередь, приводит к необходимости использования многоядерных и кластерных вычислительных систем и возможностей параллельных решателей пакета. Как показывают результаты этих расчетов, далеко не все решатели одинаково эффективны.

Введение

При производстве современных лопаток для авиационных двигателей и их объединении в блиски требуется использовать новые методы соединения разных частей изделия. Наиболее широко используются линейная сварка трением.

Сварка трением – это разновидность сварки давлением, при которой нагрев осуществляется трением, вызванным перемещением друг относительно друга соединяемых частей свариваемого изделия [1]. Процесс линейной сварки трением (ЛСТ) осуществляется возвратно-поступательным движением частей, подлежащих свариванию, с частотой порядка 60 Гц и амплитудой до 3-х мм, сжимаемых для образования плотного контакта.

Согласно Вайрису и Фросту [2] в процессе линейной сварки трением выделяют четыре стадии (фазы): начальная, переходная, равновесная и завершающая. На начальной стадии свариваемые изделия приводятся в контакт под давлением и начинается их относительное движение, сопровождаемое нагревом. В течение этого процесса область контакта увеличивается за счет изнашивания шероховатостей. При достаточном тепловыделении за счет трения материал на границе становится мягче, и большие неровности начинают стачиваться на границе контакта – наступает переходная стадия процесса. Площадь контакта становится равной площади сечения образцов и образуется мягкий пластический слой, который уже не может сдерживать прижимающую нагрузку. Затем наступает равновесная стадия, характеризующаяся осевым укорачиванием вследствие вытеснения пластичного материала из зоны контакта, образуется грат. На завершающей стадии механическое движение завершается и к образцам прикладывается дополнительное давление (проковка) для образования сварного соединения.

При математическом моделировании процесса линейной сварки трением необходимо учитывать следующие особенности процесса:

- Быстротечность процесса – весь процесс линейной сварки трением составляет около 2 сек. За это время происходит нагрев на 500-600 С и напряжения достигают предела текучести (100 МПа). Высокая скорость процесса – частота колебаний брусков составляет порядка 50 Гц при амплитуде колебаний порядка 2 мм. Для сходимости расчетных методов необходимо выбирать очень маленький шаг по времени ($10^{-4} \dots 10^{-5}$

сек.). Время расчета возрастает за счет большого количества итераций по времени (1000 итераций за 1 шаг, необходимость разбивки всего процесса на несколько шагов).

- Ограниченное количество симметрий модели. Бруски имеют только зеркальную симметрию в плоскости движения, что позволяет уменьшить количество элементов, участвующих в расчете, только вдвое. При расчетах моделей, приближенных к реальности (форма лопатки) симметрия отсутствует. Это означает, что необходимо моделировать полную трехмерную задачу с мелкой неравномерной сеткой.

Таким образом, для моделирования процесса ЛСТ требуются большие вычислительные ресурсы, включая возможность проведения параллельных вычислений на многопроцессорных системах.

В данной работе было проведено математическое моделирование второй стадии линейной сварки трением в пакете ANSYS Multiphysics. Проведена оценка эффективности различных решателей на разных задачах.

1. Постановка задачи

Математическое моделирование процесса линейной сварки трением является сложной задачей, поскольку в рамках этого процесса происходит несколько физических явлений:

1. неравномерное движение тел (используются законы механики);
2. скольжение одного тела по поверхности другого (используются законы механики);
3. нагрев и остывание (используются законы термодинамики);
4. упруго-пластические деформации (используются законы теории упругости и термодинамики).

В связи с этим часто всю задачу разбивают на отдельные части по физическим явлениям и моделируют их по отдельности.

При деформации тела его точки смещаются относительно первоначального положения $\mathbf{r}^{(0)} = \{x_i^{(0)}\}$. Для описания деформаций вводят вектор деформаций $u_i = x_i - x_i^{(0)}$ [3]. В теории упругости для описания деформаций принято использовать не вектор, а тензор деформаций, определяемый следующим образом:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

В деформированном теле возникают силы, стремящиеся вернуть его в исходное состояние. Эти силы называют внутренними напряжениями и описывают при помощи тензора напряжений. Если на тело действует сила $\mathbf{F} = \{F_i\}$, то компоненты тензора внутренних напряжений для тела в равновесном состоянии можно получить из уравнения:

$$\sum_{k=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} + F_i = 0 \quad (2)$$

Связь между компонентами вектора напряжений и деформаций задается выражениями:

$$\sigma_{ik} = K \varepsilon_{ll} \delta_{ik} + 2\mu \left(\varepsilon_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} \varepsilon_{ll} \right); \quad \varepsilon_{ik} = \frac{1}{9K} \delta_{ik} \sigma_{ll} + \frac{1}{2\mu} \left(\sigma_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} \sigma_{ll} \right)$$

здесь K – модуль всестороннего сжатия, μ – модуль сдвига.

Условие равновесия тела, в котором деформации вызваны силами приложенными к его поверхности в векторной форме имеет вид:

$$\text{grad} \cdot \text{div } \mathbf{u} + (1 - 2\nu) \Delta \mathbf{u} = 0, \quad (3)$$

здесь ν – коэффициент Пуассона, а внешние силы входят в условие в качестве граничных условий.

Для деформаций, изменяющихся со временем уравнение (2) примет вид [4]:

$$\sum_{k=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} + F_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}$$

При деформировании тела, сопровождающемся изменением температуры (как вследствие внешнего нагрева, так и в результате самой деформации) тензор внутренних напряжений задается выражением [3]:

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

где α – коэффициент теплового расширения. Если тело нагрето не равномерно, то появляются объемные силы и условие равновесия (3) приобретает вид [83]:

$$\frac{3(1-\nu)}{1+\nu}\text{grad div } \mathbf{u} - \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}\text{rot rot } \mathbf{u} = \alpha\nabla T$$

Распределение температуры в объеме образца определяется уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a\nabla T) + f$$

где f – внешний источник тепла. В процессе линейной сварки трением тепло выделяется за счет трения. Закон трения выберем в форме Амотона-Кулона:

$$F_{fr} = \lambda(T)R_n$$

здесь $\lambda(T)$ – коэффициент трения, зависящий от температуры, R_n – сила реакции опоры.

Для материалов в справочниках обычно указываются такие параметры как модуль юнга E и коэффициент Пуассона ν . Запишем выражения, определяющие связь между этими параметрами и модулями сдвига и всестороннего сжатия [3]:

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

В ходе работы было исследовано три задачи: нагрев образцов за счет трения (термо-структурная), нагрев одного образца движущимся источником тепла (тепловая) и образец внутри зажима (структурная).

1.1 Геометрия образцов

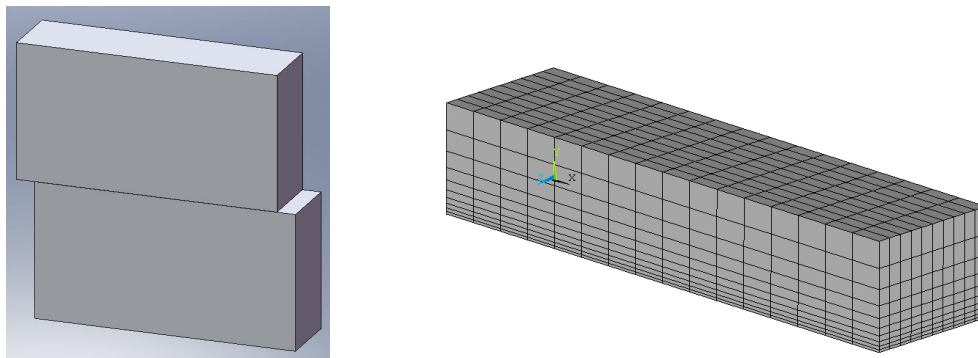


Рис. 1. Геометрия задачи (слева) и расчетная сетка (справа)

Исследуются термо-упругие деформации образцов размером 26мм×35мм×13мм из сплава сплава Ti6Al4V (Рис. 1). Для повышения точности расчетов без увеличения числа конечных элементов была использована неравномерная сетка вдоль оси Oy (т.к. область нагрева располагается в тонком слое вблизи контакта, то рассматривается слой меньшей толщины в 5 мм), в двух других направлениях сетка равномерная. Рассматривается адиабатический процесс (замкнутая система).

1.2 Термо-структурная задача

Геометрическая модель состоит из двух одинаковых брусков, стоящих один на другом.

Верхний образец скользит по поверхности нижнего образца вдоль длинной стороны, нижний образец неподвижен. Для задания параметров скольжения между брусками создается

контакт. Тип контакта – закрытый и скользящий, без взаимного проникновения. Коэффициент трения равен 0.3.

Как в качестве объемного элемента используется 3D 20-ти узловой тип элемента SOLID 226 [5].

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 верхнюю грань верхнего образца задано постоянное давление 100 МПа.

Рассматривается изотропный упругий материал. В модели материала используются параметры сплава Ti6Al4V [6].

1.3 Тепловая задача

Рассматривалась модель нагрева с тепловым потоком, имитирующим тепловыделение при трении. Тепловой поток задан на каждую из плоскостей контакта по формуле:

$$q = \frac{\mu F A \omega}{2W} \frac{|\cos(\omega t)|}{L - A|\sin(\omega t)|} \Phi(x, t),$$

где $\Phi(x, t) = \frac{1}{2} [\text{sgn}(x + A\sin(\omega t)) + \text{sgn}(L - A\sin(\omega t) - x)]$.

Таким образом, тепловой поток, заданный на контактных гранях, пульсирует во времени и колеблется вдоль оси Oх.

В данной задаче используется переменный источник тепла, зависящий от времени по периодическому закону. В качестве конечных элементов выбраны тепловые 20-ти точечные элементы SOLID 90. Использовались те же параметры материала, что и в предыдущей задаче.

1.4 Структурная задача

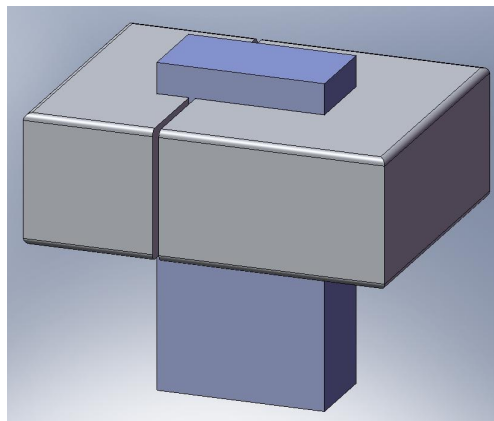


Рис. 2. Геометрия структурной задачи

Структурная задача рассматривалась на примере статического зажима образца (Рис. 2). Здесь рассматривалась наиболее простая конструкция зажима: две прямоугольные скобы сжимают образец вдоль более длинной стороны. Для этого на две противоположные грани зажима действует давление 100 МПа. Помимо этого, такое же давление задано на верхнюю грань верхнего образца, нижняя грань нижнего образца закреплена по вертикали.

Как для зажима, так и для образца задавались те же параметры материала, как и ранее. Для расчетов использовались структурные 20-ти точечные элементы SOLID 186.

2. Результаты моделирования

Нами были получены поля температур и напряжений (Рис. 3). При рассмотрении распределения температуры вдоль контрольных линий, обозначенных на рис. 3, можно

отметить, что перепад температуры в области контакта достигает величины порядка 500 К (Рис. 4). Вследствие такой неравномерности нагрева контакта течение материала начнется в небольших локальных областях.

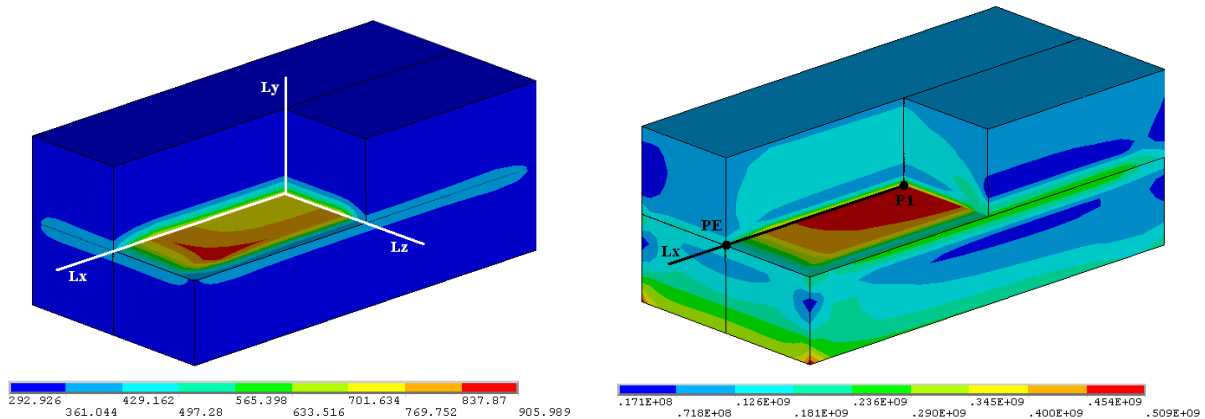


Рис. 3. Распределение поля температур (слева) и поля напряжений фон Мизеса (справа) в конечный момент времени 0.1 с

При рассмотрении напряжений следует, прежде всего, отметить, что максимальное напряжение наблюдается в плоскости контакта. В достаточно большой области контакта напряжения остаются постоянными, но вдоль границ их величина резко уменьшается вследствие падения температуры (рис. 6).

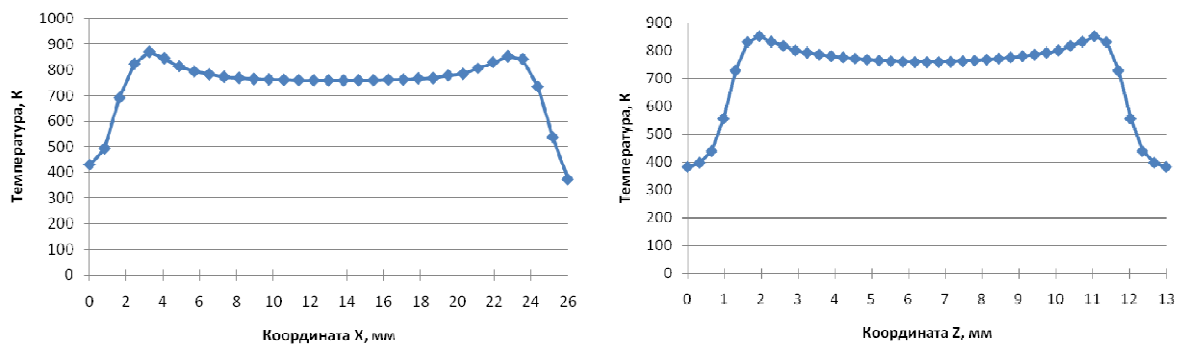


Рис. 4. Распределение температуры в плоскости контакта вдоль направления движения (слева) и перпендикулярно направлению движения (справа) в конечный момент времени 0.1 с

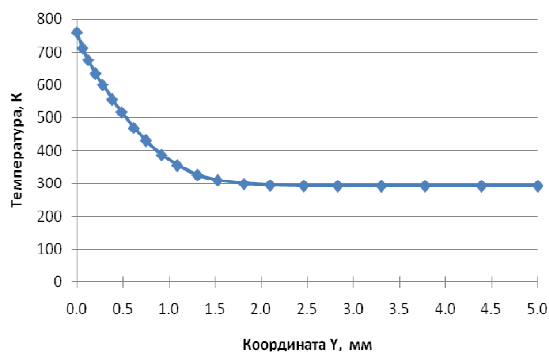


Рис. 5. Распределение температуры по вертикали в центре контакта в конечный момент времени 0.1 с

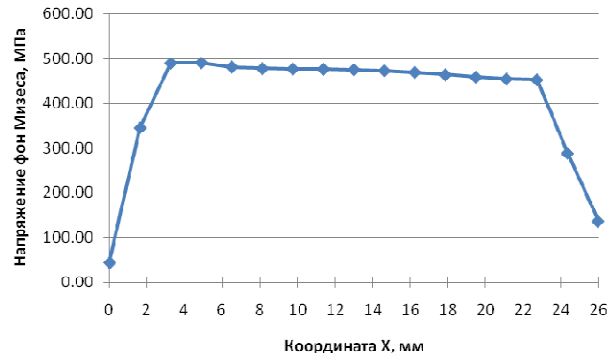


Рис. 6. Распределение напряжения фон Мизеса в плоскости контакта вдоль направления движения в конечный момент времени 0.1 с

Температурная задача дала в целом результаты, аналогичные предыдущей задаче. Так как в формуле заданного теплового потока не учитывается зависимость от координаты Z, то в тепловой задаче распределение тепла вдоль соответствующей оси не отличается от

полученного в предыдущей задаче, вдоль остальных направлений результаты очень близки к полученным в задаче с трением.

В результате структурной задачи получили поле напряжений фон Мизеса, показанное на рисунке 7. Видно, что напряжения распределяются вдоль более длинной грани, так как более существенным оказывается давление со стороны боковых частей скоб, направленное вдоль более короткой боковой стороны образца. Напряжения концентрируются на углах образцов, где давление действует вдоль двух взаимноперпендикулярных направлений.

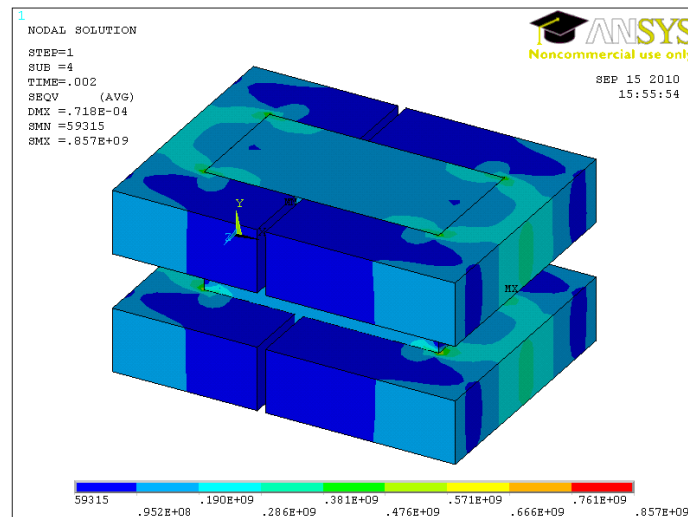


Рис. 7. Распределение поля напряжений фон Мизеса

3. Оценка эффективности решателей

Рассматривались следующие решатели: Sparse, JCG, AMG, ICCG, PCG.

3.1 Решатели ANSYS Mechanical APDL

При решении термоупругих задач необходимо учитывать взаимное влияние температурного поля и напряженно-деформированного состояния материала. При этом модифицируется уравнение баланса энергии (или энтропии). Кроме того, в связь напряжений и деформаций добавляется тепловое расширение. В результате после дискретизации появляется связь пространственных степеней свободы с температурными.

Связь степеней свободы различных типов может быть учтена различными способами. Сильная связь (strong coupling в терминологии ANSYS, также называемая иногда матричной или полной связью) означает учет взаимодействия через общесистемную матрицу, когда в каждом уравнении присутствуют как температурные, так и структурные переменные.

При слабой связи (weak coupling, связь через нагрузки) учет взаимосвязей производится путем добавления слагаемых в правую часть системы. При этом каждый элемент правой части зависит от переменных обоих типов, но их значения берутся с предыдущей итерации, что может приводить к проблемам со сходимостью для сложных термоупругих задач. Матрица для задачи со слабой связью является симметричной, что облегчает решение системы и приводит к значительному снижению времени расчета.

В результате дискретизации уравнений на основе метода конечных элементов получается нелинейная система уравнений вида [7]

$$[K]\{u\} = \{F^a\},$$

где $\{u\}$ – вектор степеней свободы (неизвестных), $[K]$ – матрица коэффициентов, в общем случае зависящих от $\{u\}$, $\{F^a\}$ – вектор нагрузок.

Для поиска решения в пакете применяется метод Ньютона-Рафсона решения систем нелинейных уравнений. Базовый метод представляет собой итеративную процедуру:

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\},$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\},$$

где индекс i определяет номер итерации установления равновесия (equilibrium iteration в терминологии ANSYS), $[K_i^T]$ – матрица Якоби (касательная матрица), составленная из производных от элементов $[K]$, $\{F_i^{nr}\}$ – вектор возвращающих нагрузок (внутренние нагрузки на элементы). Коэффициенты $[K_i^T]$ и $\{F_i^{nr}\}$ вычисляются при значениях степеней свободы, взятых с текущей итерации $\{u_i\}$.

Сходимость процесса определяется по норме вектора невязок $\{R\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\}$ и вектора изменения степеней свободы $\{\Delta u_i\}$ (команда **CNVTOL**). Может быть также ограничено количество итераций равновесия (команда **NEQIT**).

На каждой итерации равновесия требуется один раз решить линейную систему уравнений. Так как количество неизвестных определяется количеством степеней свободы задачи, размерность системы достаточно велика. Успешно решать такие системы помогает тот факт, что возникающие матрицы являются сильно разреженными (структура матрицы определяется связями узлов в конечных элементах). Для решения таких систем применяются хорошо разработанные методы вычислительной линейной алгебры. На них основаны различные решатели, присутствующие в любом инженерном вычислительном пакете.

Для решения полученной системы в пакете применяется несколько методов. Рассмотрим их последовательно.

Прямой (точный) метод (sparse direct solver) основан на LU-разложении матрицы. Метод активируется командой **EQSLV**, **SPARSE** или автоматически. Имеется версия решателя для систем с распределенной памятью – **DSPARSE**. Максимальное ускорение расчета достигается, когда разделенная на узлы задача полностью помещается в оперативную память.

Помимо прямого метода в пакете доступен ряд итерационных методов. Они, как правило, требуют меньшего объема памяти и вычислительного времени, лучше распараллеливаются, но требуют более тщательной настройки. В частности, для плохо обусловленных матриц итерационный метод может сильно замедлиться, вообще не сойтись или даже получить неверное решение (зависит от задачи, конкретного метода и настроек решателя).

В основном это методы, основанные на методе сопряженных градиентов с различными предобуславливателями. Решатель **JCG** использует предобуславливатель Якоби (диагональная часть матрицы $[K]$). Активируется командой **EQSLV**, **JCG**.

Решатель **ICCG** строит предобуславливатель на основе неполного разложения Холецкого, может работать с несимметричными матрицами.

Решатель **PCG** работает только с вещественными симметрическими матрицами, но содержит очень эффективный алгоритм предобуславливания. При этом достигается максимальная скорость вычислений и возможность работы с плохо обусловленными матрицами. Используемый объем оперативной памяти примерно в 2 раза больше, чем для JCG.

Распределенные версии решателей – **DPCG** и **DJCG**, пригодны для запуска на системах с распределенной памятью. Математические формулировки при этом не изменяются, добавляется межузловой обмен данными и параллельное построение самих матриц.

Решатель **AMG** основан на алгебраическом многосеточном методе и является одним из самых эффективных для плохо обусловленных матриц. Решатель более требователен к оперативной памяти, чем PCG.

4.2 Сравнение эффективности решателей

4.2.1 Термо-структурная задача

Один узел кластера состоит из 2-х процессоров, содержащих 4 ядра. Тесты для SMP проводились на одном узле для разного числа ядер (от 1 до 8). Расчеты для MPI (версия HP-MPI) запускались на разном числе узлов.

Для термо-структурной задачи с сильной связью в силу несимметричности матрицы доступны только решатели JCG, PCG и SPARSE, при этом оба итерационных метода в этом случае не поддерживают распараллеливание с распределенной памятью и запускались только для SMP. В результате было получено, что итерационные методы практически не ускоряются. Прямой метод ускоряется, но не более чем в 2 раза.

Термо-структурная задача со слабой связью распараллеливается лучше. Однако использование более 5 ядер на узле при любом решателе не дает прирост производительности, скорее всего, из-за интенсивной работы решателя с памятью (количество неизвестных в каждом уравнении довольно велико) и из-за перестройки матрицы после каждой итерации, которая выполняется последовательно. Наиболее эффективным оказывается распараллеливание на 2 узла по 4-5 ядер, при этом большее ускорение показывает решатель JCG.

Решатель SPARSE показывает ускорение на уровне 2.5 при использовании 6 ядер и больше на двух узлах (Рис. 10).

На рисунках 8 – 10 показаны зависимости ускорения от количества узлов и суммарного числа ядер для наиболее эффективных решателей.

В Таблице 1 указаны времена расчетов термо-структурной задачи для некоторых решателей, а также используемая ими память. Видно, что для малого числа ядер метод PCG считает лучше, но с увеличением количества ядер наиболее быстрым решателем становится JCG. Отметим, что метод JCG использует значительно меньше оперативной памяти, по сравнению с другими решателями. Отметим, что при использовании более чем 8 ядер используемая память на ядро медленно уменьшается.

Таблица 1. Время расчета и размер используемой памяти для термо-структурной задачи для различных решателей (со слабой связью)

Метод	Время (1 ядро), ч.	Лучшее время, ч.	Размер (1x1), МБ	Размер на 1 ядро (1x8), МБ
JCG	8,35	2,32 (2x4)	83,6	26,6
PCG	5,16	3,53 (3x5)	107	67,9
SPARSE	7,9	3,23 (2x5)	754	350

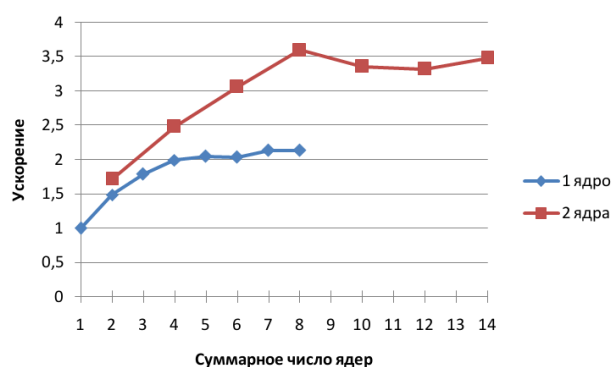


Рис. 8. Термо-структурная задача: зависимость ускорения от суммарного числа ядер относительно расчета на одном ядре (8,35 ч) для решателя JCG (Weak) / MPI.

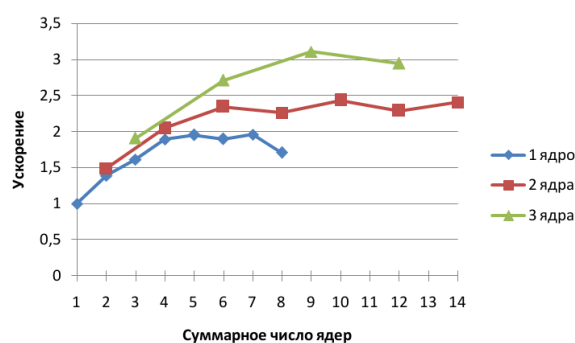


Рис. 9. Термо-структурная задача: зависимость ускорения от суммарного числа ядер относительно расчета на одном ядре (5,16 ч) для решателя PCG (Weak) / MPI.

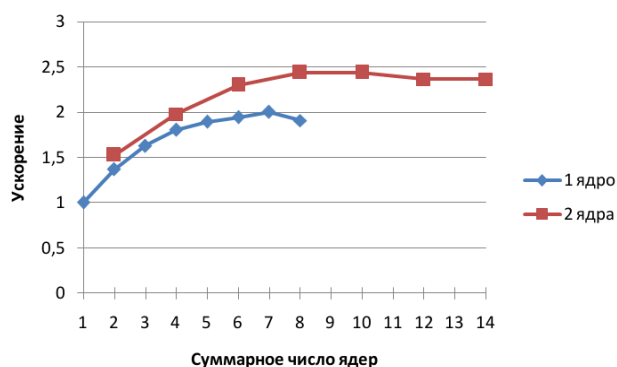


Рис. 10. Термо-структурная задача: зависимость ускорения от суммарного числа ядер относительно расчета на одном ядре (7,9 ч) для решателя Sparse (Weak) / MPI

4.2.2 Тепловая задача

Тепловая задача считается на несколько порядков быстрее и имеет значительно более низкую вычислительную сложность по сравнению с термо-структурной задачей, что влияет на более повышение ускорения. Тепловая задача распараллеливается лучше термо-структурной. Ее распараллеливание ограничивается только её малым размером (см., например, Рис. 13, где справа изображен график ускорения для задачи с количеством элементов в 8 раз большим, чем для задачи слева).

В Таблице 2 показаны времена расчетов тепловой задачи для некоторых решателей, а также используемая ими память. Наиболее эффективным и по времени расчета и по используемой памяти оказался метод JCG. Метод PCG показал плохое распараллеливание и экономичное использование памяти. Метод SPARSE распараллеливает задачу лучше, но использует на порядок больше памяти, чем другие решатели.

Таблица 2. Время расчета и размер используемой памяти для тепловой задачи для различных решателей

Метод	Время (1 ядро), сек.	Лучшее время, сек.	Размер (1x1), МБ	Размер на 1 ядро (1x8), МБ
JCG	207	77 (1x6)	15,7	10,0
PCG	367	185 (1x7)	19,5	12,9
SPARSE	251	102 (2x4)	251	168

Метод PCG с SMP показал низкое ускорение (до 1,4 раза с максимумом на 4 ядрах). С MPI метод JCG показывает ускорение до 2,7 для конфигурации 1x6 (Рис. 11), а PCG – до 2,0 для конфигурации 1x7 (Рис. 12). Метод Sparse показал максимальное ускорение 2,5 для конфигурации с двумя узлами, однако, для задачи с большим количеством элементов, как было отмечено выше, ускорение возрастает (Рис. 13).

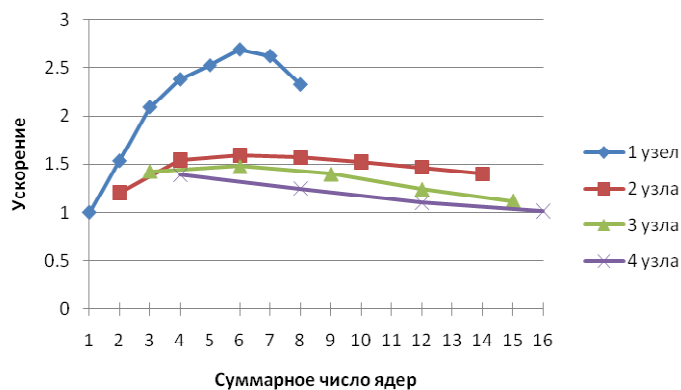


Рис. 11. Тепловая задача: зависимость ускорения от суммарного числа ядер относительно расчета на одном ядре (269 с) для решателя JCG / MPI

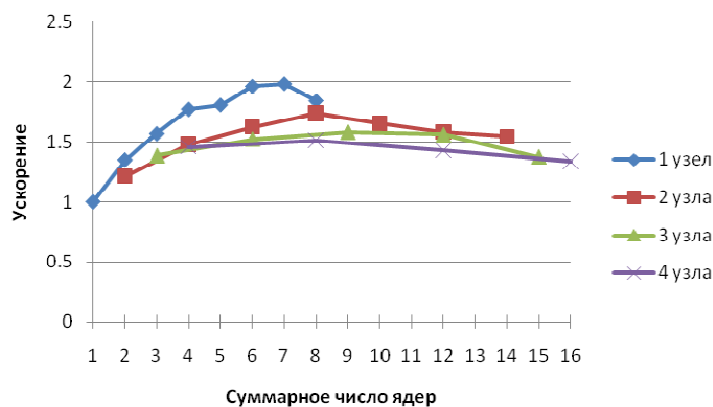


Рис. 12. Тепловая задача: зависимость ускорения от суммарного числа ядер относительно расчета на одном ядре (253 с) для решателя PCG / MPI

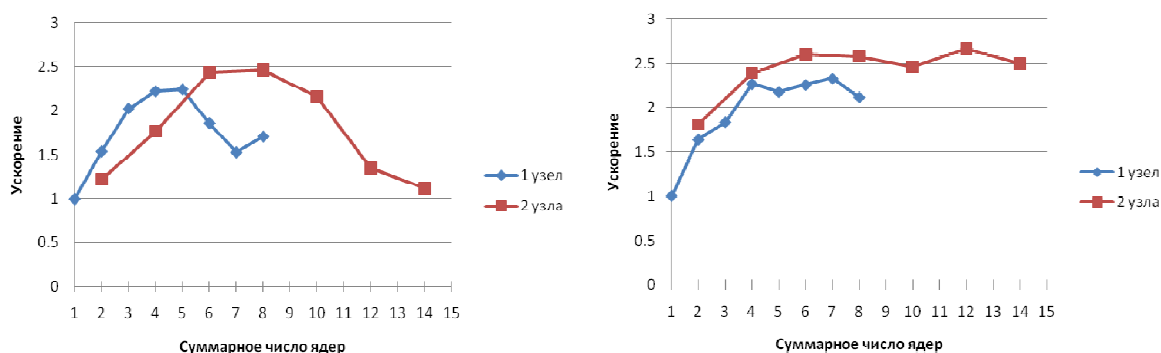


Рис. 13. Тепловая задача: зависимость ускорения от суммарного числа ядер относительно расчета на одном ядре (251 с) для решателя Sparse / MPI. Справа задача в увеличенном в 8 раз числом элементов

4.2.3 Структурная задача

Структурную задачу возможно решить только с помощью прямого метода Sparse. Из-за большого количества контактных и структурных элементов (общее количество 20336 элементов) решатель требует большого количества памяти (3,3 ГБ для одного узла и 637 МБ на ядро для конфигурации 1x8). На Рис. 14 представлена зависимость ускорения от суммарного количества ядер. Падение ускорения на одном узле 6 и более ядер связано с тем, что задача не помещалась полностью в оперативную память и система подключала более медленную память подкачки. Для двух и более узлов количество доступной памяти выросло, что и сказалось на росте ускорения. Отметим хорошее ускорение (до 5,7 раз) при использовании 3 и 4 узлов. При времени выполнения задачи 43 мин. на одном узле, наилучшее время составило 7,6 мин.

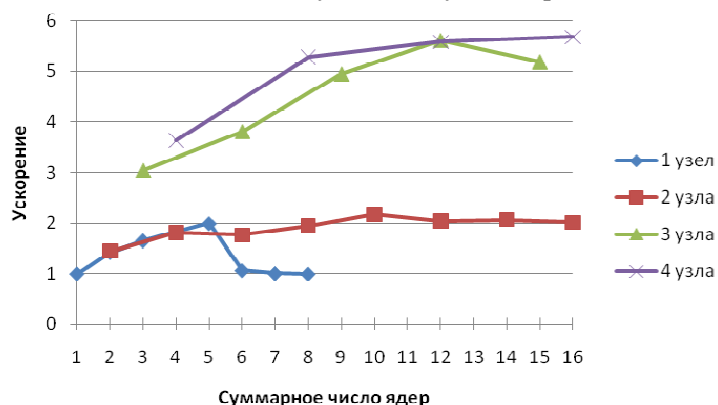


Рис. 14. Структурная задача: зависимость ускорения от суммарного числа ядер относительно расчета на одном ядре (0,72 ч) для решателя Sparse / MPI

4.2.4 Расчет на GPU

В новой версии ANSYS Multiphysics 13.0 добавлена возможность использования для вычислений графических процессоров Nvidia. Пока поддерживается только использования одного ускорителя совместно с SMP-версиями решателей SPARSE, PCG и JCG.

В качестве тестовой конфигурации была взята двухпроцессорная рабочая станция Fujitsu Siemens Computers V840 (процессоры Opteron 2214 Dual-Core, 2.2 GHz, объем оперативной памяти 8 GB, PC2-5300 FB-DIMM ECC) с графическим ускорителем NVIDIA Tesla C1060.

Решалась аналогичная предыдущим термо-структурная задача (трение брусков с разогревом) с 9600 20-узловыми элементами (10 временных шагов, что достаточно для быстрой оценки).

На рисунке 15 представлена зависимость ускорения от количества ядер для трёх различных решателей. Больше всего выигрывает от использования GPU точный решатель Sparse. Наибольшее ускорение демонстрирует решатель PCG, но использование GPU ускоряет его лишь на 20-36% (для 4 и 1 ядра соответственно). Скорее всего, это связано с быстрым выполнением ускоряющейся части кода по сравнению с остающимися последовательными фрагментами, что подтверждается наблюдением за загрузкой CPU и GPU (минуты между итерациями равновесия работает только одно ядро без GPU).

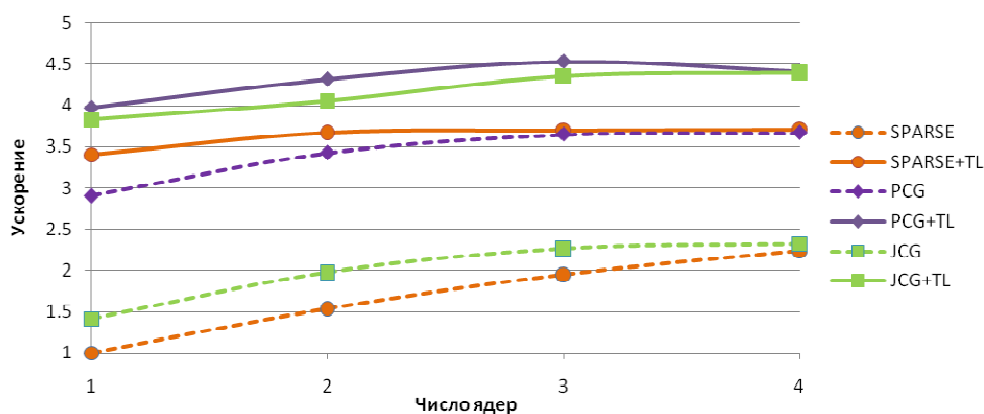


Рис. 15. Зависимость ускорения от числа ядер и относительно расчета на одном ядре (3,6 ч) для решателя SPARSE

Заключение

Была исследована эффективность различных решателей Ansys Multiphysics для трех типовых задач, связанных с моделированием процесса линейной сварки трением. Было показано, что наиболее эффективными для тепловой и термо-структурной задач при слабой связи степеней свободы оказываются решатели JCG и PCG, а для структурной задачи наибольшую эффективность показал решатель Sparse. Расчеты на GPU показали прирост ускорения по сравнению с CPU.

Благодарности

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 от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Литература

1. Вилль В.И. Сварка металлов трением. – М.: Машиностроение, 1970.
2. A.Vairis, M.Frost. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti6Al4V. *Material Science and Engineering. A* 271, (1999), pp 477—484.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика в 10 т., Т.VII Теория упругости — М.: Наука, 1987. – 248 с.
4. Jeongho Ahn, David E. Stewart Dynamic frictionless contact in linear viscoelasticity // *IMA Journal of Numerical Analysis* (2009) 29, pp.43–71.
5. *Basic Analysis Guide* // Release 12.1, November 2009, ANSYS Inc.
6. ГОСТ Титановый сплав ВТ6
7. *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications* // Release 12.1, November 2009, ANSYS Inc.