

Опыт использования гибридных вычислительных систем при моделировании линейной сварки трением

Видимо, в мире параллельных вычислений никогда не наступит спокойствие. За последнее десятилетие мировые рейтинги заполнили кластерные системы, потеснив все альтернативные архитектуры. “Параллельность” вышла за пределы суперкомпьютерного мира и материализовалась явным образом в персональных компьютерах. Стандартные процессоры (CPU) x86 уже не удивляют планомерным ростом количества ядер. Последние годы ознаменовались новым веянием: для ускорения вычислений общего назначения начали использоваться графические процессоры (GPU). Как же повлияли последние архитектурные новшества на скорость решения реальных задач?

Это мы попытались выяснить при сравнительном тестировании эффективности решения задачи, типичной для моделирования процесса линейной сварки трением, в MPI-версии программного модуля ANSYS Mechanical на двух вычислительных системах, представляющих различные поколения. В тестировании были задействованы узлы вычислительного кластера Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ) на базе процессоров Intel Xeon Clovertown и гибридный вычислительный сервер, в состав которого входят как более новые процессоры Intel Xeon Nehalem, так и графические процессоры NVIDIA Tesla Fermi.

Надо отдать должное производителям прикладного программного обеспечения, которые, выступая в роли догоняющих, старательно производят адаптацию своих про-

граммных комплексов к новым вычислительным системам. Известный пакет конечно-элементного анализа ANSYS одним из первых обзавелся поддержкой расчетов на GPU NVIDIA. Такая возможность появилась в модуле термочисленных расчетов (ANSYS Mechanical) для систем с общей памятью начиная с 13-й версии. С выходом 14-й версии также стало возможным вести расчеты с использованием GPU в модуле для систем с распределенной памятью, правда, пока задействовать можно не более одного графического процессора на вычислительном узле. В ходе проведенного тестирования были использованы обе версии ANSYS, что позволило оценить не только преимущества новой вычислительной платформы, но и эффект ускорения компьютерного моделирования при переходе на новую версию пакета.

Линейная сварка трением (ЛСТ) становится сегодня ключевой технологией формирования сварных соединений из трудносвариваемых материалов. Данная технология успешно применяется в авиастроении при производстве газотурбинных двигателей (рис. 1) для “наращивания” деталей вместо их обработки из заготовки, а также в ремонтном производстве.

В России работы по внедрению технологии ЛСТ для создания авиационных двигателей нового поколения в настоящее время проводятся на ОАО “Уфимское моторостроительное производственное объединение” (УМПО). Определение оптимальных режимов проведения сварки в зависимости от геометрии свариваемых поверхностей и ис-

пользуемых материалов требует предварительного математического и компьютерного моделирования. Соответствующие исследования ведутся сотрудниками УМПО и УГАТУ по проекту “Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток газотурбинных двигателей с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений” с привлечением высокопроизводительных вычислительных ресурсов университета. Данный проект реализуется в рамках постановления № 218 правительства РФ от 09.04.2010 г. “О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства”.

Сварка трением – это разновидность сварки давлением, при которой нагрев осуществляется трением, вызванным перемещением друг относительно друга соединяемых частей свариваемого изделия. Благодаря тому, что в процессе трения тепловыделение



Рис. 1. Блисковые конструкции, в производстве которых востребована технология ЛСТ

локализовано в тонких приповерхностных слоях металла, то есть именно там, где это и требуется, такая сварка обладает рядом важных достоинств:

- ▶ высокой производительностью – полный цикл сварки длится всего от одной до нескольких секунд;
- ▶ малым потреблением энергии – в процессе сварки материал не достигает точки плавления, и при этом прогревается только небольшая область вблизи плоскости контакта свариваемых частей;
- ▶ высоким качеством сварного шва и стабильностью качества сварных соединений;
- ▶ возможностью сварки металлов и сплавов в различных сочетаниях и снижением требований к предварительной подготовке свариваемых поверхностей;
- ▶ гигиеничностью процесса (отсутствием ультрафиолетового излучения, вредных газовых выделений, горячих брызг металла и т. д.) и др.

В процессе ЛСТ тепло выделяется при возвратно-поступательном движении свариваемых частей с частотой порядка 60 Гц и амплитудой до 3 мм, сжимаемых для образования плотного контакта. Выделяют четыре стадии процесса ЛСТ. На начальной стадии свариваемые изделия приводятся в контакт под давлением и начинается их относительное движение, сопровождаемое износом шероховатостей. В переходной стадии происходит нагрев и упругое деформирование изделий (упругая стадия). При достижении предела текучести наступает равновесная стадия, ха-

рактеризующаяся осевым укорачиванием. Происходит вытеснение пластичного материала из зоны контакта (рис. 2). На завершающей стадии механическое движение завершается, и к образцам прикладывается дополнительное давление (проковка) для образования сварного соединения.

Необходимо отметить, что компьютерное моделирование только упругой стадии процесса ЛСТ, которая на практике длится около 0,2 секунды, занимает в последовательном режиме около недели. Поэтому говорить о расчете полной модели без привлечения параллельных вычислений не приходится.

Высокая вычислительная сложность моделирования определяется следующими ключевыми особенностями рассматриваемой задачи. Большие напряжения в области контакта приводят к интенсивному тепловыделению и резким перепадам температур, вследствие чего при моделировании требуется мелкая сетка. Выполняется связанный расчет прочностной и тепловой задач. Быстротечность процесса обуславливает необходимость выбора маленького (10^{-4} - 10^{-5} с) шага по времени для сходимости расчетных методов. Также при решении учитываются зависимости механических и теплофизических свойств материала от температуры (физическая нелинейность) и изменение нагрузок (перемещение, давление) с течением времени (конструктивная нелинейность).

В ходе нашего сравнительного тестирования было исследовано время решения на различных вычислительных платформах (табл. 1) термопрочностной задачи моделирования упругой стадии ЛСТ



Рис. 2. Образцы, сваренные с помощью ЛСТ

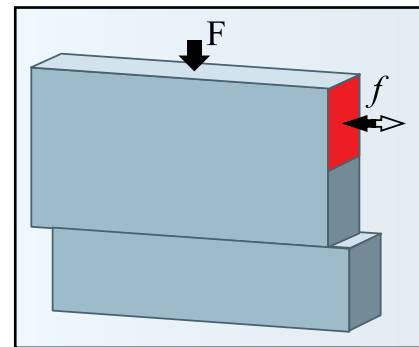


Рис. 3. Схематическая геометрическая модель

стальных образцов до возникновения пластических деформаций средствами MPI-версии программного модуля ANSYS Mechanical. Геометрическая модель состоит из двух образцов прямоугольной формы, расположенных один на другом (рис. 3). Модель содержит 18 432 элемента средним размером 0,55 мм. На каждом временном шаге методом SPARSE решается система из около 300 тыс. уравнений.

Для начала рассмотрим ускорение при параллельном решении

Таблица 1. Характеристики вычислительных узлов, задействованных для тестирования

Вычислительные узлы, год установки	Пиковая производительность узла	Количество задействованных узлов	Процессоры	Ускорители	Оперативная память
IBM HS21, комм. среда InfiniBand 10 Гбит/с, 2007 г.	74,56 Гфлопс	до 64	2x Intel Xeon 5345 2,33 ГГц	нет	8-64 Гб, DDR2 667 МГц, ECC, FB-DIMM
IBM iDataPlex dx360 M3, 2011 г.	140,64 Гфлопс (2xCPU) + 1 030 Гфлопс (2xGPU) = 1 170,64 Гфлопс	1	2x Intel Xeon 5670 2,93 ГГц	2x GPU NVIDIA Tesla M2050	48 Гб, DDR3 1 333 МГц, ECC

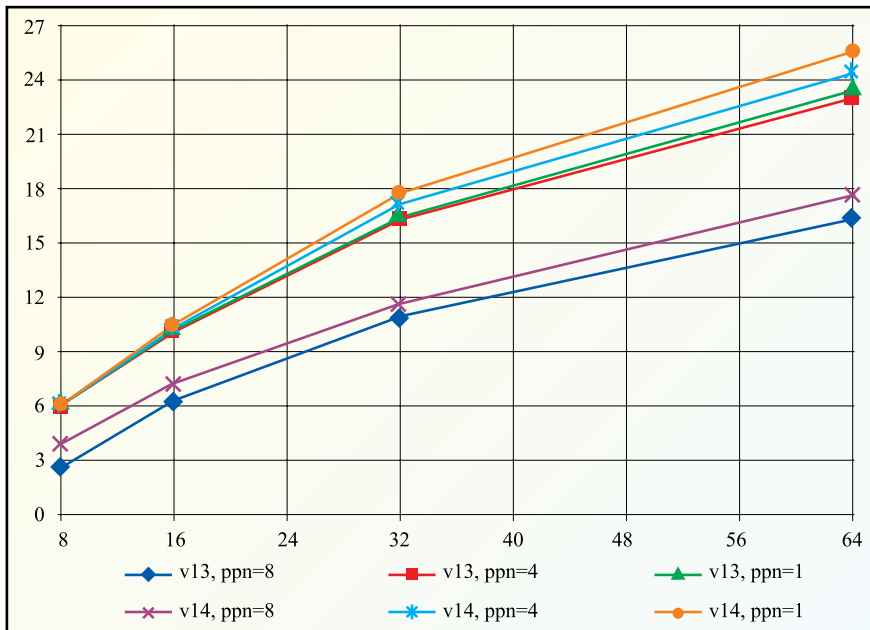


Рис. 4. Ускорение в зависимости от числа ядер при расчете на узлах HS21 относительно времени расчета на одном ядре узла HS21 в ANSYS v13

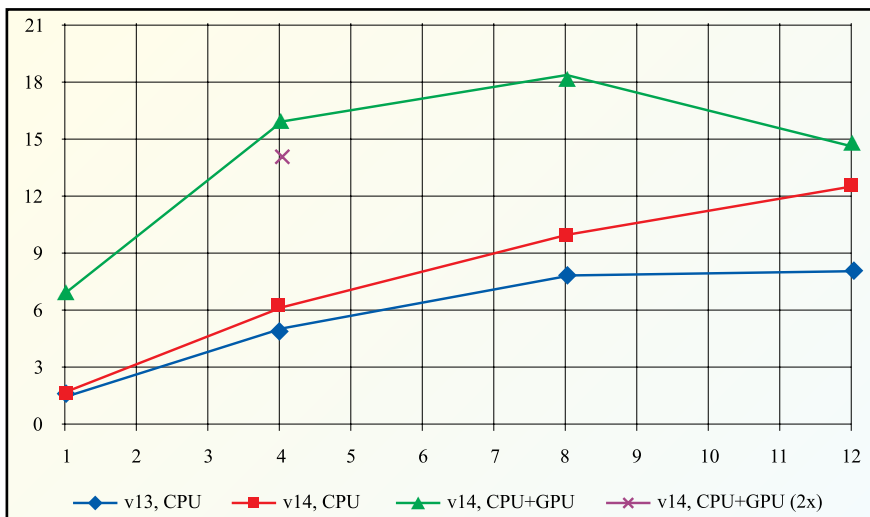


Рис. 5. Ускорение в зависимости от числа ядер при расчете на узле iDataPlex dx360 M3 относительно времени расчета на одном ядре узла HS21 в ANSYS v13

задачи в MPI-версии ANSYS v13 и v14 на вычислительных узлах IBM HS21 (рис. 4). Ускорение приведено относительно времени последовательного расчета на одном ядре в ANSYS v13. Максимальное ускорение, достигнутое на 64 ядрах, составило около 25 раз. Дальнейшее увеличение числа ядер не производилось в силу ограниченного числа лицензий. Из рисунка видно, что при фиксированном числе параллельных процессов и соответственно вычислительных ядер расчет идет быстрее, если на узле задействовать как можно меньше вычислительных ядер, минимизируя таким образом конкуренцию процессов за общие ресурсы. Также наблюдается выигрыш от использования новой, 14-й

версии ANSYS – в среднем расчеты идут на 5 % быстрее.

А теперь перейдем к результатам тестирования на гибридном узле с графическими процессорами (рис. 5). Ускорение рассмотрено относительно той же величины, что и ранее. Заметно преимущество от использования более современных процессоров Intel: при расчете на 8 ядрах внутри одного узла производительность вычислений возрастает более чем в 2,5 раза. Максимальное ускорение за счет CPU получено при расчете на 12 ядрах в новой версии ANSYS (v14, CPU на рис. 5). Здесь использование 14-й версии дает существенный (до 1,5 раз) выигрыш относительно предыдущей. Впридачу к более производительным вычисле-

ниям на CPU MPI-версия программного модуля ANSYS Mechanical v14 позволяет задействовать для ускорения вычислений на узле один графический процессор. В результате удается достичь рекордного показателя производительности с использованием одного нового вычислительного узла (v14, CPU+GPU на рис. 5): время расчета задачи на восьми ядрах CPU и одном GPU эквивалентно времени расчета на 32 ядрах восьми узлов HS21 вычислительного кластера.

Более того, не стоит забывать, что второй графический процессор гибридного узла остался незадействованным. В связи с этим при необходимости проведения массовых расчетов представляется рациональным запускать на узле две задачи, скажем, на 4 ядрах CPU и одном GPU каждую. Соответствующие эксперименты (v14, CPU+GPU (2x) на рис. 5) показали, что совместный запуск незначительно замедляет выполнение каждой из задач, тем самым позволяя практически удвоить производительность массовых вычислений. Фактически получается, что для рассмотренного класса задач новая гибридная система по реальной производительности может заменить уже не 8, а около 12 “обычных” узлов!

В целом можно констатировать, что минимальное время решения термочувствительной задачи, типичной для моделирования процесса линейной сварки трением, достигнуто на множестве узлов вычислительного кластера на базе процессоров Intel Xeon Clovertown. Тем не менее, гибридный сервер показал впечатляющую производительность. А это значит, что современные программно-аппаратные решения позволяют вывести моделирование на новый качественный уровень.

**Р. К. Газизов, д.ф.-м.н., профессор,
заведующий кафедрой,
А. В. Юлдашев, научный сотрудник,
А. М. Ямилева, аспирант,
кафедра высокопроизводительных
вычислительных технологий
и систем,
Уфимский государственный
авиационный технический
университет**

ТЕХНОЛОГИЯ NVIDIA® MAXIMUS™
ТВОРИТЕ БЕЗ ПРОМЕДЛЕНИЙ



СЕРТИФИЦИРОВАННЫЕ РАБОЧИЕ СТАНЦИИ ARBYTE® CADSTATION С ТЕХНОЛОГИЕЙ NVIDIA MAXIMUS:

ARBYTE® CADStation WS479MM

Назначение: дизайн или САПР + рендеринг или инженерные расчеты, работа с HD-видео

Конфигурация: шестиядерный CPU | до 64ГБ RAM | NVIDIA Quadro 4000 2ГБ | NVIDIA Tesla C2075 6ГБ

ARBYTE® CADStation WS479MB

Назначение: тяжелые САПР + инженерные расчеты, рендеринг реального времени

Конфигурация: шестиядерный CPU | до 64ГБ RAM | NVIDIA Quadro 6000 6ГБ | NVIDIA Tesla C2075 6ГБ

ARBYTE® CADStation WS479MS

Назначение: работа с трехмерными моделями и рендеринг

Конфигурация: четырехъядерный CPU | до 64ГБ RAM | NVIDIA Quadro 2000 1ГБ | NVIDIA Tesla C2075 6ГБ

ПОДДЕРЖКА И ГАРАНТИЯ:

- оптимизация под задачи Заказчика
- предварительное тестирование
- 5 лет всероссийской гарантии
- первые 2 года эксплуатации – обслуживание на месте
- более 100 партнеров и сервисных центров по всей России



ARBYTE®

Москва, Днепропетровская ул.2
+7 [495] 223-4-322 | www.arbyte.ru