

Недавние обновления решателя для связанного теплопереноса

Томас Клёпель, Петер Фогель
Дайнамор, Штутгарт, Германия

Резюме

В этой статье рассматриваются недавние разработки в связанном решателе теплопереноса LS-DYNA®. Конкретные потребности в сложных производственных процессах, таких как горячая формовка, термообработка и сварка, так же как и задачи, включающие различные области физики, такие как моделирование аккумуляторов, послужили мотивировкой этих новых разработок.

В начале статьи рассматриваются две новые опции теплового контакта. Во-первых, сейчас можно рассматривать теплопередачу между краем оболочки и поверхностью (поверхностью оболочки или объемных элементов). Во-вторых, была реализована новая специальная формулировка контакта при сварке. После достижения определенной температуры, формулировка переключается от скользящей к связанной постановке и при этом начинают использоваться другие параметры теплопереноса. Мотивация обеих модификаций лежала в области моделирования линейной сварки, они оказались полезными и для решения других задач.

В качестве второй темы статьи мы рассматриваем такой недавно реализованный элемент как тепловая композитная толстая оболочка. Здесь вводятся дополнительные температурные степени свободы для каждого слоя композитной (составной) структуры. В качестве основной задачи выступает построение связанной модели аккумулятора, учитывающей механические, электромагнитные и тепловые свойства ячеек аккумулятора.

Наконец, в-третьих, представлены недавние дополнения к тепловым граничным условиям Дирихле. Задание времен появления (рождения) и исчезновения (смерти) позволяет активизировать или отключать ограничения в определенные моменты времени. Кроме того, в качестве упрощенного моделирования пятна сопротивления при точечной сварке, температуру можно напрямую задавать на эллипсоидной зоне, представляющей пятно сварки.

Тепловой контакт по краю оболочки

В этом разделе мы представляем первый из двух недавно разработанных алгоритмов контакта в LS-DYNA [1]. Эти разработки были мотивированы вычислительной механикой сварки, но они являются достаточно общими для того, чтобы быть полезными также и для других связанных термомеханических применений.

При моделировании процессов промышленного производства обычно используются элементы и дискретизации при помощи оболочечных и объемных элементов. В стандартных алгоритмах теплового контакта программы LS-DYNA рассматриваются только контакты поверхности с поверхностью. Следовательно, моделирование теплопередачи между краем оболочки и поверхностью объемных или оболочечных элементов находится вне возможностей этих алгоритмов. Поскольку моделирование T-образных соединений выполняется при помощи оболочечных элементов и соединение края оболочки гранью объемного элемента представляет особый интерес, например, для моделирования сварки, была разработана новая опция контакта.

Эта новая реализация пользуется формулировкой толстой оболочки LS-DYNA, которая отличается билинейными плоскостными функциями формы и квадратичными функциями формы температуры по толщине оболочки. На нижней и верхней поверхностях оболочечного элемента создаются виртуальные узлы, которые используются для воссоздания трехмерной геометрии на краях оболочки.

С точки зрения пользователя, эта новая реализация рассматривается скорее не как новый тип контакта, а как вариация имеющихся определений контакта. Чтобы включить реконструированную геометрию в алгоритме контакта, надо в файле ключевых слов на карточке теплового контакта установить значение параметра ALGO на 2 (двухсторонний) или на 3 (односторонний).

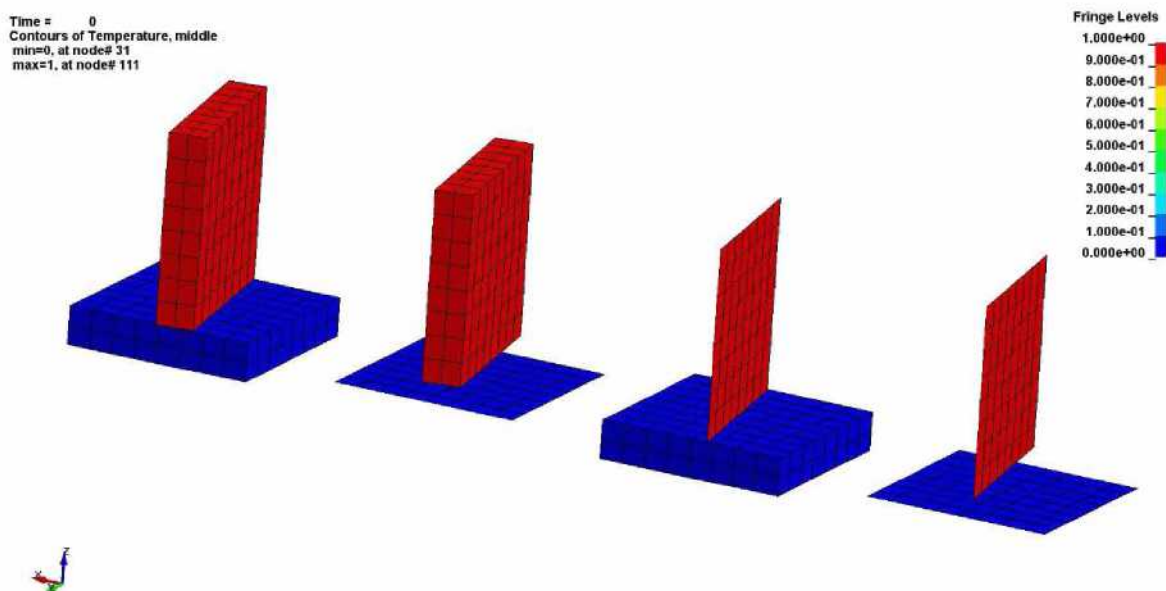


Рисунок 1. Задачи по проверке теплового контакта по краю оболочечного элемента, начальное распределение температур

Формулировка проверялась при помощи теплопереноса в Т-образном соединении. Четыре рассматривавшиеся модели показаны на Рисунке 1. Во всех четырех случаях горячая верхняя деталь вводилась в контакт с холодной поверхностью. Получающиеся в результате тепловые поля, представленные на Рисунке 2, показывают, что теплоперенос через край верхней детали не сильно варьируется, если эти детали моделируются оболочечными или объемными элементами.

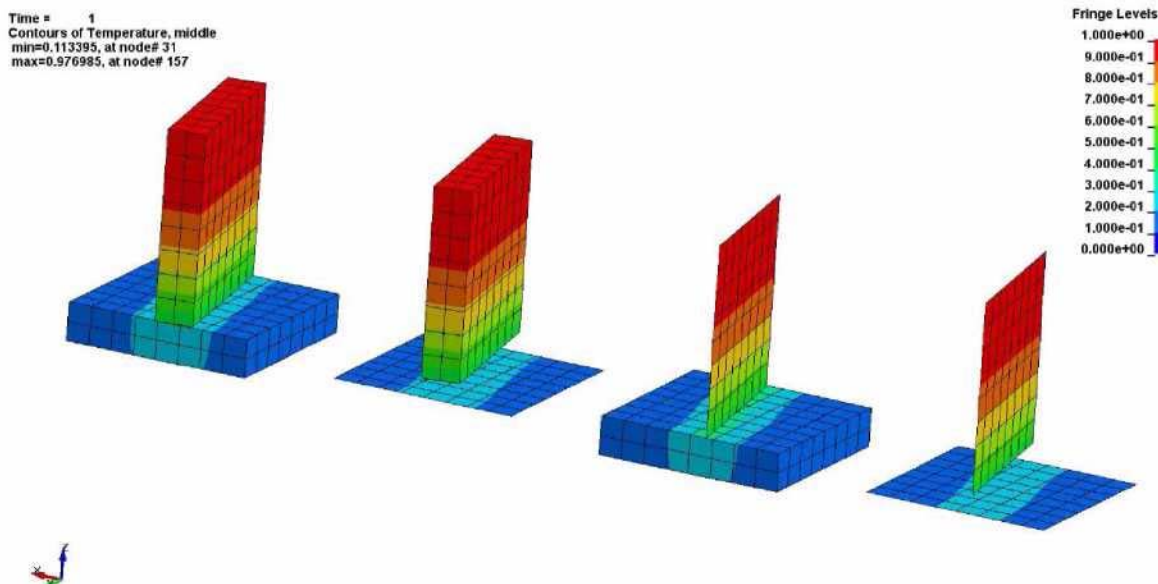


Рисунок 2. Задачи по проверке теплового контакта по краю оболочечного элемента, итоговое распределение температур

Контакт при сварке

Мотивация второй новой разработки также лежит в области моделирования сварки. Сегодня во многих процессах используется присадочный материал, но материалы соединяемых деталей локально разогреваются, например, лазерным лучом. Если температура на контактной поверхности превышает

температуру плавления, то образуется прочное соединение и детали уже нельзя разделить.

Это поведение представлено в новой формулировке термомеханического контакта. Такой контакт можно задать в LS-DYNA как *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIED_WELD_THERMAL. Механически, этот контакт может локально переключаться от скользящего контакта к сварному, т. е. соединенному контакту. Этот переключатель срабатывает, если температура на обеих поверхностях в контактной зоне достигает определенного значения, задаваемого пользователем. При этом данный переключатель не влияет на формулировку контакта для остальной контактной поверхности. После того, как достигнуто сваренное состояние контакта, его нельзя вернуть обратно к скользящей формулировке.

С тепловой «стороны» моделируется похожее поведение. Ключевое слово контакта вводит дополнительный параметр для определения теплопроводности в сварной зоне контакта. В отличие от механической составляющей контакта, изменение тепловых свойств инициируется, если одна сторона достигла критической температуры, то есть начала плавиться.

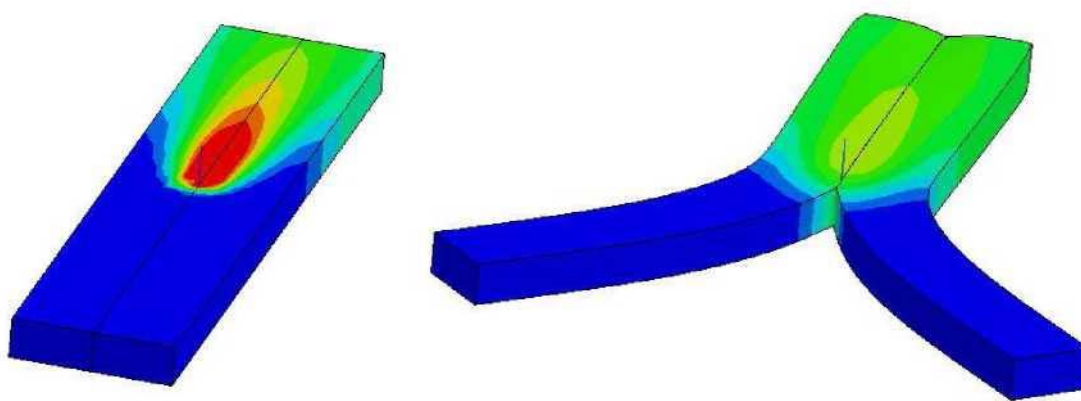


Рисунок 3: Сварка и последующее нагружение сварного шва встык двух полос металла. Слева показано температурное поле в конце шага сварки. Нагружение (справа) приводит к разделению только тех контактных поверхностей, которые не испытали воздействия тепла.

Примером применения этой новой возможности может служить сварка встык, показанная на Рисунке 3. Как показано слева, сварочная горелка движется только вдоль одной половины контактной области. После сварки к двум концам конструкции прикладывается сила. По деформации видно, что разделиться могут только те части конструкции, у которых контакт не подвергался воздействию источника тепла. Соединенный (связанный) контакт в сваренных областях не позволяет частям конструкции разделиться.

Новая функциональность в моделировании сварки была расширена на формулировки контакт оболочка-оболочка, чтобы можно было, например, моделировать лазерную сварку стопки из двух или более заготовок. Пример такой задачи приводится на Рисунке 4. Здесь источник тепла частично сваривает две тонких заготовки. После краткого охлаждения к несваренным концам прикладываются силы, растягивающие эти детали в разные стороны, но видно, что локальный нагрев не дает этим деталям полностью разделиться.

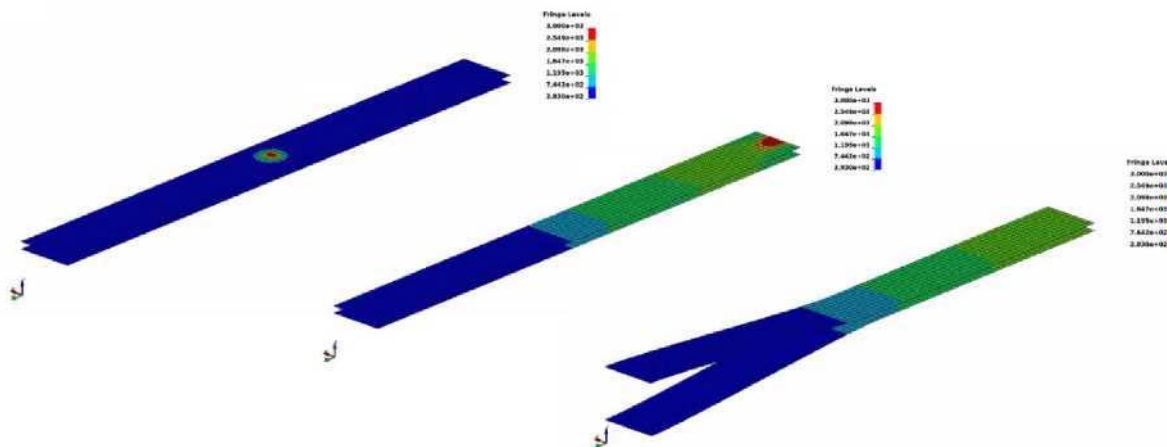


Рисунок 4. Сварка и последующее нагружение двух листов металла. Слева направо: температурное поле в начале шага сварки, в конце шага сварки и после механического нагружения. Разделение запрещено в зонах контакта, подвергшихся действию тепла.

ТЕПЛОВЫЕ КОМПЗИТНЫЕ ТОЛСТОБОЛОЧЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Литий-ионные аккумуляторы очень важны во многих областях. В частности, для использования таких аккумуляторов в электромобилях необходимо иметь надежное прогнозирование отклика таких аккумуляторов в различных областях физики на неблагоприятные условия.

Предполагается, что в современной автомобильной промышленности компьютерные инженерные программы должны служить для такого рода анализа во время проектирования и тем самым сокращать объемы реального физического тестирования. Надежный численный анализ должен по крайней мере рассматривать конструкционное механическое, электромагнитное и тепловое поведение аккумуляторной системы.

Механический отклик может быть смоделирован при помощи хорошо отработанных методик моделирования в LS-DYNA. Численное представление сложных электромагнитных и электрохимических процессов было добавлено в программу LS-DYNA относительно недавно при помощи так называемой модели «распределенной цепи Рендела» [2]. Эта модель связана с механическим решателем, чтобы учитывать деформацию ячейки аккумулятора. Кроме того, тепло джоулевого нагрева передается в тепловой решатель как дополнительный источник тепла и получающееся распределение температур влияет на материалы и параметры электромагнитного решателя.

В целом, моделирование ячеек аккумулятора сталкивается с противоречащими требованиями по заданию модели для теплового и электромагнитного решателя с одной стороны, и механического решателя конструкции с другой стороны: очень высокое разрешение (уровень дискретизации) различных слоев ячейки необходимо для электромагнитного и теплового решателя, но это очень высокое разрешение слоев с очень различающимися механическими свойствами создает трудности для конструкционного решателя и кардинальным образом сокращает максимальный временной шаг явных по времени схем интегрирования. Кроме того, построение моделей очень высокого разрешения становится очень громоздким и неудобным для пользователя.

В силу этого в LS-DYNA было реализовано расширение модели «распределенная цепь Рендела» на композитные (составные) толстые оболочки (Tshell elements), см. ссылку [3]. С механической точки зрения на конструкцию, многочисленные и возможно различные слои могут быть заданы одним шести- или пятигранным элементом по толщине. Число слоев соответствует числу точек интегрирования по толщине, но также не имеет влияния на число степеней свободы в системе или максимальный временной шаг для расчета по явной методике. Электромагнитный решатель, однако, использует составное определение элемента для внутренней реконструкции модели с высоким разрешением. Вследствие этого дополнительные степени свободы порождаются и включаются в систему уравнений.

В течение какого-то времени простая обработка композитных (составных) оболочечных элементов была частью теплового решателя. Однако тепловой композитный (составной) толсто оболочечный (Tshell) был реализован лишь недавно. Так же, как это сделано в электромагнитном решателе, тепловой

решатель внутренним образом и автоматически реконструирует сетку (модель) высокого разрешения на основе заданного пользователем «пакета» слоев внутри толстоболочечного элемента, см. Рисунок 5.

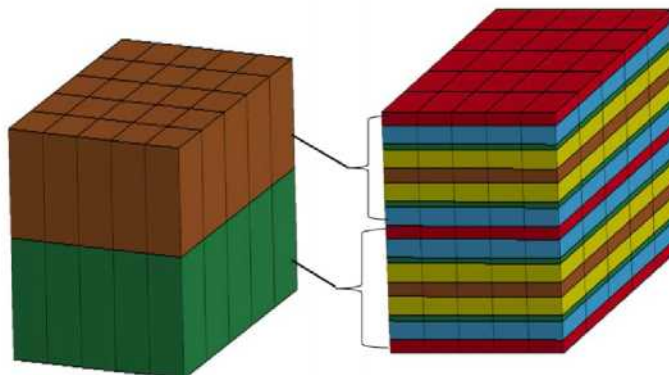


Рисунок 5. Сетка толстоболочечного элемента (Tshell) заданная пользователем (слева) и реконструированная электромагнитная/тепловая сетка основанная на «пакете» слоев композита толстоболочечного элемента (справа).

Естественно, при такой реконструкции вводятся дополнительные виртуальные элементы и виртуальные узлы, что, таким образом, требует обработки дополнительных степеней свободы в неявной системе. Тепловой решатель отслеживает списки, в которых связываются виртуальные узлы реконструированной сетки и «физические» узлы пользовательской сетки. Это позволяет давать информацию о температуре для отдельных точек интегрирования толстоболочечных элементов как это видится конструкционным решателем и позволяет обмениваться информацией между виртуальными узлами электромагнитного и теплового решателей, у которых нумерация не обязательно совпадает.

Для проверки реализации были заданы различные связанные моделирования. Особенно интересным было сравнение ячейки аккумулятора, смоделированной при помощи сетки объемных элементов высокого разрешения, и той же ячейки, представленной в виде «пакета» композитных (составных) толстоболочечных элементов. Как и ожидалось, результаты теплового и электромагнитного моделирования идеально согласуются.

Представленная разработка позволяет намного более легкое построение моделей. Но при этом важно заметить, что пост-обработка данных для реконструированных сеток еще недоступна. Пока для узлов оригинальной сетки доступна только усредненная по толщине информация от электромагнитного решателя и температурная информация для узлов оригинальной сетки. Если это будет необходимо, то в будущем будет реализована и выдача для реконструированных объектов.

Недавние и будущие расширения температурных граничных условий

В тепловом решателе LS-DYNA ключевое слово `*BOUNDARY_TEMPERATURE_NODE/SET` задает условия Дирихле для степеней свободы у температуры на узлах. Заданные значения температуры могут варьировать во времени и могут быть заданы как функция пространственного положения и скорости при помощи `*DEFINE_FUNCTION`.

Недавно к этому ключевому добавили времена начала (рождения) и конца (смерти), что позволило включать или выключать граничное условие в ходе моделирования. Перед включением и после выключения, температура на узлах является стандартной степенью свободы для теплового решателя.

Одним из возможных применений этого подхода является моделирование процесса резистивной точечной сварки (*resistive spot welds, RSW*) в автомобильной промышленности, где приходится обрабатывать сотни сварных соединений. Здесь почти невозможно включать все точки соединения в подробное связанное моделирование. Альтернатива следующая: для каждого точечного сварного соединения распределение температур на площади сварки в ходе процесса более-менее известно из этапа калибровки. Теперь этой информацией можно воспользоваться, чтобы задать температуру во время

сварки отдельной точки в ходе процесса и выключить это условие после того, как сварочный инструмент будет удален от сваренных деталей.

Для упрощения процесса подготовки ввода, особенно для больших моделей с большим числом точек сварки, в настоящее время разрабатывается новое ключевое слово *BOUNDARY_TEMPERATURE_RSW. При помощи этого ключевого слова можно будет задать зону сварки, так же, как и значения температуры для центра и границ этой зоны. В настоящее время принято квадратичное распределение. Далее возможно будет предоставлена кривая нагружения, чтобы масштабировать температуру в ходе процесса сварки, то есть между началом (рождением) и концом (смертью) применимости конкретного граничного условия.

Литература

1. Kloppel, T, “The Structural Conjugate Heat Transfer Solver - Recent Developments”, Proc. of 11th European LS-DYNA Conference, Salzburg, 2017.
2. L’Eplattenier, P. et al., “A distributed Randles circuit model for battery abuse simulations using LS-DYNA”, Proc. of 14th International LS-DYNA Users Conference, Dearborn, 2016
3. L’Eplattenier, P. et al, “Battery abuse simulations using LS-DYNA”, Proc. of 11th European LS-DYNA Conference, Salzburg, 2017.