

Особенности моделирования сварки трением, аддитивной технологии производства узлов современных аэрокосмических систем

А.Т. Бикмеев, Р.К. Газизов, А. Ваирис, А.М. Ямилева

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

- ротационная сварка трением (RFW – rotary friction welding), при которой одна или обе свариваемые части приводятся во вращение вокруг собственной оси, а затем прижимаются с большим усилием друг к другу. Ограничением является требование осесимметричности свариваемых частей. Технология может быть использована для создания валов современных газотурбинных двигателей (ГТД), состоящих из различных сплавов: титановых в области компрессора низкого давления (КНД) и суперсплавов в области компрессора высокого давления (КВД). Кроме того, в США ротационная сварка трением используется в производстве баков ракетно-космических систем, что позволило заменить клепку твердосплавным соединением;
- сварка вращающимся инструментом (FSW – friction stir welding), при которой вращающийся с большой частотой инструмент из твердого жаропрочного сплава вносится в щель/стык между двумя пластинами и затем перемещается вдоль стыка, перемешивая материал свариваемых пластин и создавая, таким образом, прочное соединение. В настоящее время известны успешные сварки плит толщиной до 10 см. Технология может быть использована для соединения различных листовых конструкций сложной формы;
- линейная сварка трением (LFW – Linear friction welding), при которой один или оба свариваемых образца приводятся в периодическое движение друг относительно друга вдоль выделенного направления с заданной частотой и амплитудой. Технология линейной сварки трением (ЛСТ) может применяться для создания различных деталей сложной формы и не имеет ограничений по геометрии. ЛСТ является практически единственным способом создания облегченных моноколес для современных газотурбинных двигателей.

Процесс сварки трением впервые был предложен в СССР в 1956 г. Однако впоследствии интерес к данному процессу был потерян. В то же время в западных странах (США, Германия, Франция, Канада и др.) исследовательские работы велись достаточно активно. Большой толчок к активизации исследований линейной сварки трением дала принципиальная возможность получения облегченных блисков для новых перспективных газотурбинных двигателей. В частности, на Рис.1. показано применение процесса линейной сварки трением в производстве двигателя компании MTU (Германия) для истребителя EuroFighter Typhoon.



Рис.1. Истребитель EuroFighter Typhoon, его двигатель, а также процесс создания блиска, блиск после сварки до механообработки и компрессор низкого давления в сборе с блисками, полученными при помощи технологии ЛСТ.

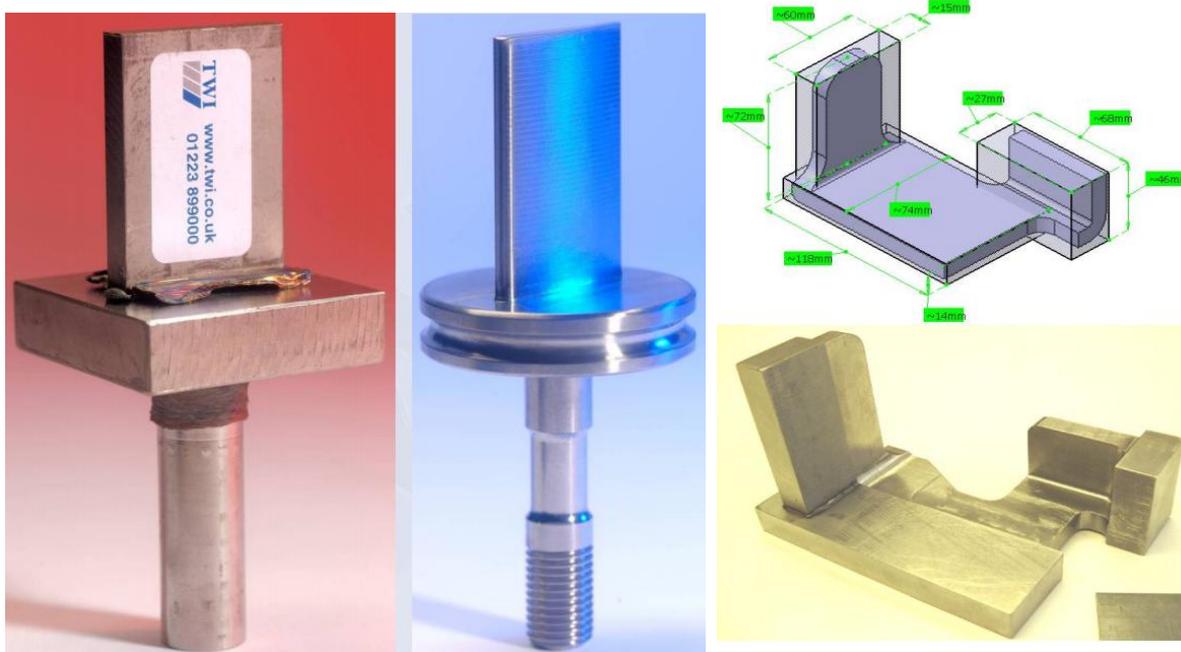


Рис.2. Примеры использования ЛСТ как аддитивной технологии в производстве различных деталей сложной формы. Коэффициент использования материала возрастает на 70-90%, время механообработки сокращается на 50-80%.

Однако применение ЛСТ не ограничивается только блисками. Как показано на Рис.2., технология линейной сварки трением может успешно применяться и для производства деталей сложной формы. Вместо того, чтобы вытачивать деталь из цельной заготовки, предлагается при помощи ЛСТ создать заготовку, имеющую форму весьма близкую к требуемой, а затем уже провести механообработку, придав детали конечную форму.

Преимуществом технологий сварки трением является отсутствие расплавления свариваемых материалов, что позволяет избежать различных дефектов, возникающих при кристаллизации металлов.

Исследователи выделяют 4 стадии процесса ЛСТ, каждая из которых характеризуется своим основным физическим процессом [2]: фаза-1, подготовительная – сухое внешнее трение; фаза 2, переходная – зарождение и миграция дислокаций; фаза 3, равновесная – пластическая деформация; фаза 4, проковка – упруго-пластические деформации при остывании. Таким образом, построение полной компьютерной модели всего процесса представляется практически невозможным, поэтому, как правило, создаются модели отдельных стадий линейной сварки трением, при этом данные одной модели полностью или частично могут передаваться в качестве исходных данных другой модели.

Следует отметить и тот факт, что в силу скоротечности данного вида сварки, экспериментальное исследование эволюции характеристик свариваемых материалов и параметров процесса затруднительно. В частности, трудно получить изменение температуры в сварном шве и полное распределение температуры по поверхности контакта в любой момент времени.

В рамках выполнения работ по исследованию процесса ЛСТ в УГАТУ было создано несколько различных моделей различных стадий процесса ЛСТ с использованием таких инженерных пакетов, как ANSYS, Abaqus, Deform 3D и Transvalor FORGE, а также проведено исследование эффективности распараллеливания моделей в инженерных пакетах [3-5]. Отметим, что модели одной и той же стадии процесса ЛСТ были созданы в различных пакетах. Это позволило ввести дополнительный критерий корректности расчетов на основе сравнения результатов полученных при использовании различных пакетов. То есть, если два пакета в одинаковой постановке задачи дают одинаковые количественные и качественные результаты, то расчет считается условно верным. В случае значительного расхождения результатов, постановка задачи менялась.

Обзор созданных моделей представлен ниже.

Модель переходной и равновесной стадий ЛСТ в ANSYS Mechanical

Основной сложностью при моделировании процесса ЛСТ является моделирование значительных пластических деформаций, в частности, грата, и образования соединения образцов. Для упрощения модели и ускорения времени расчета была разработана модель ЛСТ с удалением слоев.

Модель представляет собой расширение модели упругой стадии процесса и рассчитывает термоупругие деформации образцов. В качестве модели материала использовались титановые и алюминиевые сплавы.

Закрепление и движение образцов задано с помощью граничных условий в виде ограничений на степени свободы узлов на боковых гранях образцов. Граничные условия и динамика процесса определялись параметрами экспериментальной машины.

Верхний образец скользит по поверхности нижнего образца вдоль длинной стороны (вдоль оси X) по периодическому закону $x = a \sin(2\pi ft)$ с постоянной амплитудой a и частотой f , нижний образец неподвижен. На

верхнюю грань верхнего образца задано постоянное давление, соответствующее прижимной силе F . Параметры a, f, F – входные параметры модели. Диапазон параметров определяется физикой процесса, вычислительными возможностями и разрешающей способностью КЭ сетки.

Рассматривается изотропный упругий материал. В модели возможно задание упругих механических и теплофизических свойств материала. Закон трения взят в форме Амонтона-Кулона, коэффициент трения также задается в модели материала.

Разработаны два варианта модели. В двухмерном варианте рассматривается плоская модель, что позволяет нам ускорить расчет и сократить требуемый объем памяти. Также в данном случае возможно использование качественной неравномерной сетки с маленькими элементами в области контакта и более крупными – в области зажима (см.Рис.3а.). Трехмерный вариант модели позволяет изучить процесс тепловыделения в сечении образцов. Однако время расчета и объем используемой памяти в данном случае значительно увеличиваются, поэтому данная модель менее предпочтительна для массовых расчетов, чем двухмерная. Кроме того, здесь используется ортогональная сетка (Рис.3б), не допускающая значительных изменений размера элементов.

Для моделирования процесса осадки образцов был разработан алгоритм удаления слоев. С заданной периодичностью (полупериод колебаний) выполняется анализ материала в области контакта для определения зоны пластического деформирования с помощью критерия Мизеса. Затем, исходя из объема пластического материала, определяется толщина пластического слоя. Часть этого слоя удаляется – моделируется осадка образцов. Схема алгоритма приведена на рисунке 4. Данный алгоритм реализован в модели с помощью параметрического языка APDL.

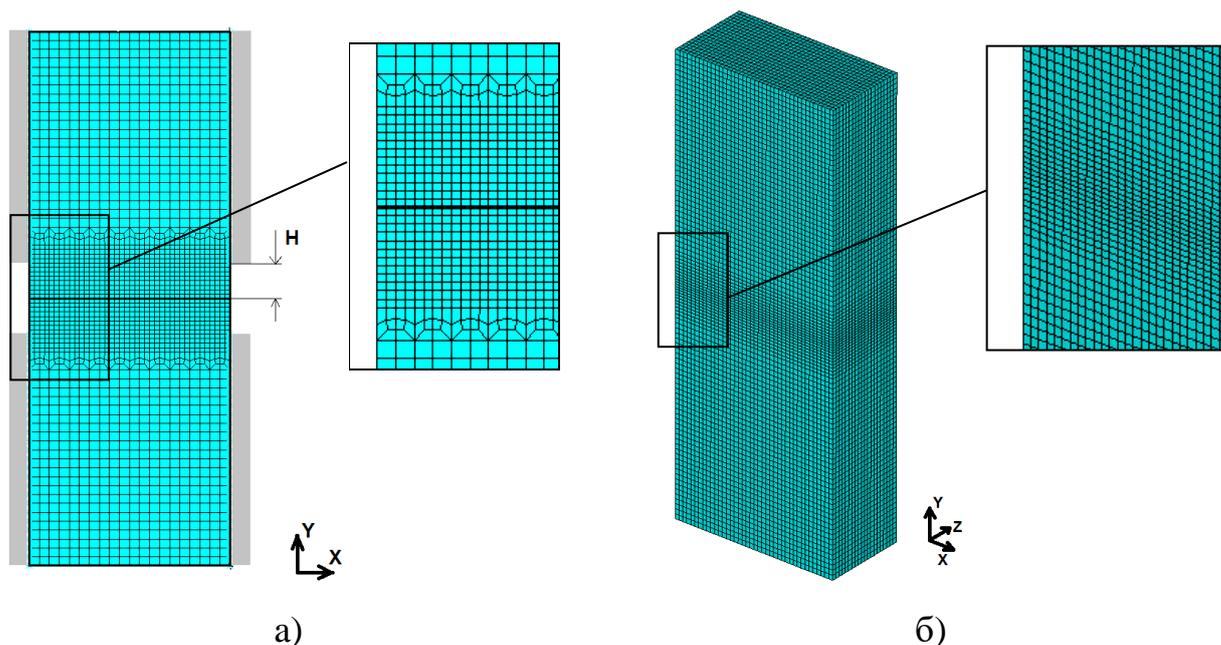


Рис.3. Конечно-элементная сетка модели: а) 2D-модель, б) 3D-модель.

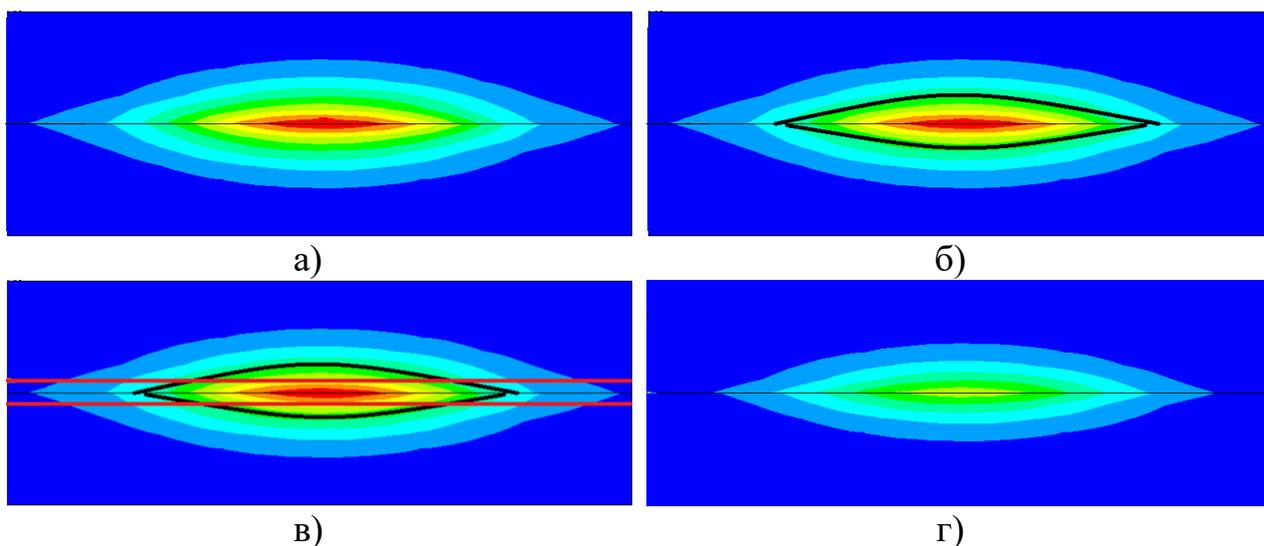


Рис.4. Схема алгоритма удаления слоев:

- а) расчет нагрева вследствие трения в упругой фазе в течение полупериода колебаний,
- б) определение зоны, где материал достиг предела текучести (по критерию Мизеса),
- в) расчет толщины слоя материала, уходящего в грат, согласно некоторому критерию,
- г) «удаление» слоя материала с помощью переноса поля температуры

Периодичность удаления слоев и процесса осадки образцов в ходе моделирования согласуется с экспериментальными данными, т.к. на грате наблюдается ребристость, свидетельствующая об отсутствии непрерывности в процессе выдавливания материала. Основным выходным параметром модели является динамика осадки. Кроме того, модель позволяет определить распределение температуры в различные моменты времени, динамику образования пластической зоны и ее форму.

Модель равновесной стадии ЛСТ в пакете FORGE

Для изучения динамики осадки была построена 2D модель в пакете Transvalor FORGE. Такая модель обладает рядом недостатков, не позволяющих получить числовые значения всех критических параметров. Например, не учитывается выход материала в грат в направлении перпендикулярном оси движения, не учитывается теплопередача в плоскости колебаний и теплообмен с окружающей средой и т.д. Однако при помощи 2D-модели можно получить данные о характере процесса осадки, основных направлениях течения материала, выходе поверхностной пленки и т.д.

В равновесной стадии образцы уже должны представлять собой единое целое, поэтому рассматривается единый образец с неравномерным распределением температуры в объеме. Такой подход часто используется исследователями [6-7].

Пластические свойства сплавов задаются на основе закона Спиттеля:

$$\sigma = Ae^{\frac{m_1 T + m_4}{\varepsilon}} \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3}$$

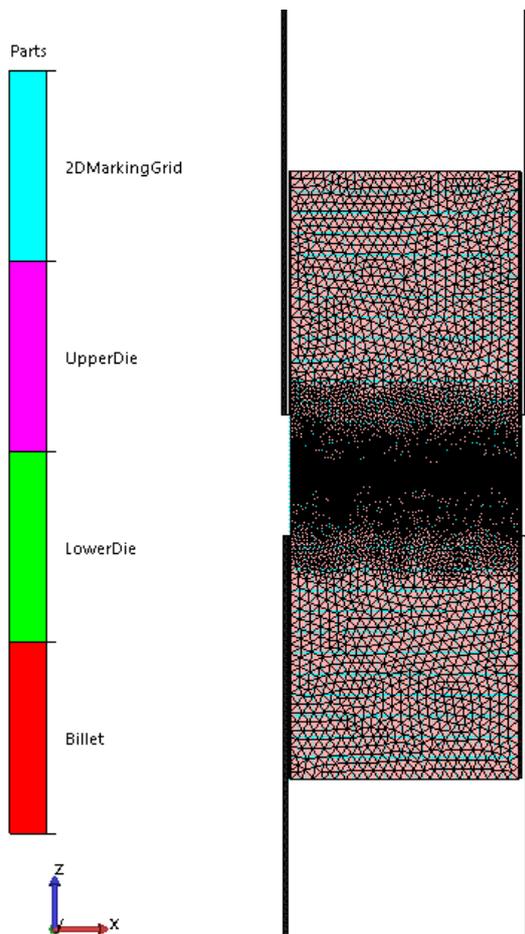


Рис.5. Внешний вид 2D-модели.

Расчетная сетка неравномерна и состоит из четырех зон, в каждой из которых размер элементов уменьшается (при переходе от периферии к центру) в 2–4 раза (см.Рис.5). Распределение температуры описывается кусочно-заданной экспоненциальной функцией $T(z)$, с максимальным значением в центре объединенного образца.

Нижняя часть оснастки движется только периодически вдоль оси X, к верхней части приложено постоянное давление, действующее вдоль оси Z.

Результаты моделирования для алюминиевого сплава типа А2024 приведены на Рис.6 и Рис.7. Расчеты показывают динамику формирования грата, а также эволюцию температурного поля в образце. Особенностью данной модели является достаточно большая величина осадки. Весьма устойчивое средство перестроения сетки (ремешинга) пакета FORGE позволяет изучать процесс осадки в деталях, а также прогнозировать удаление всех элементов окисной пленки и загрязнений из зоны контакта.

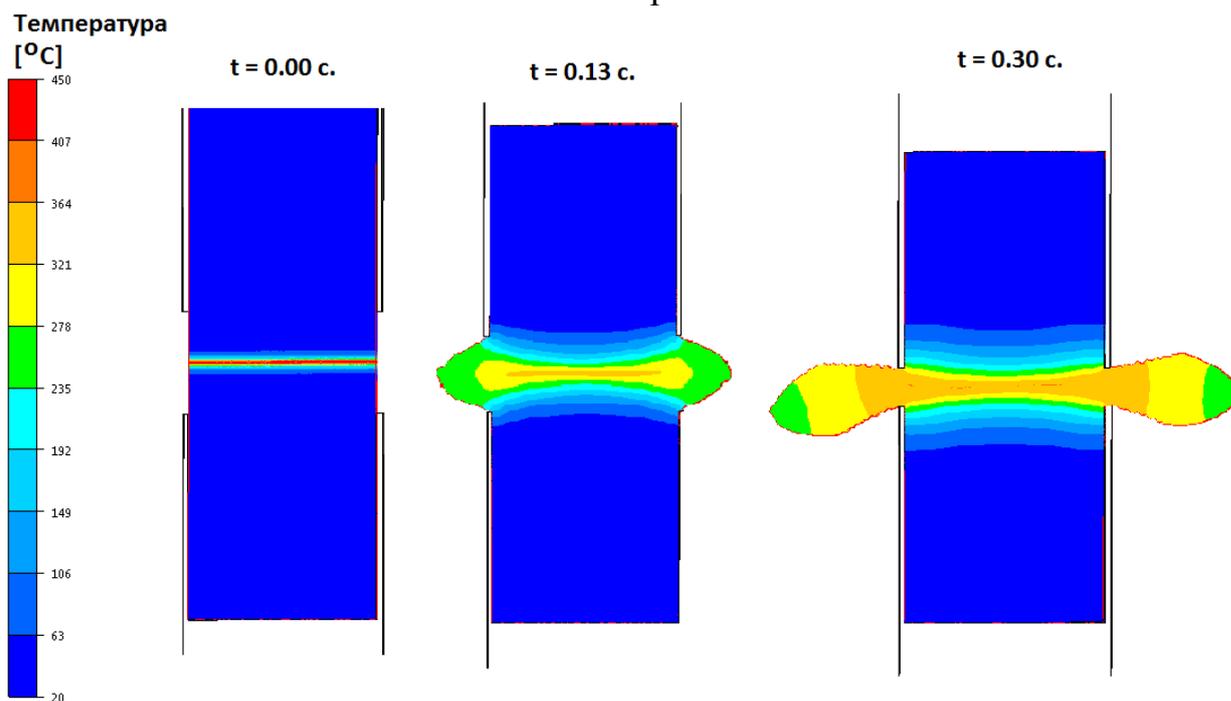


Рис.6. Изменение формы образцов и распределения температуры со временем.

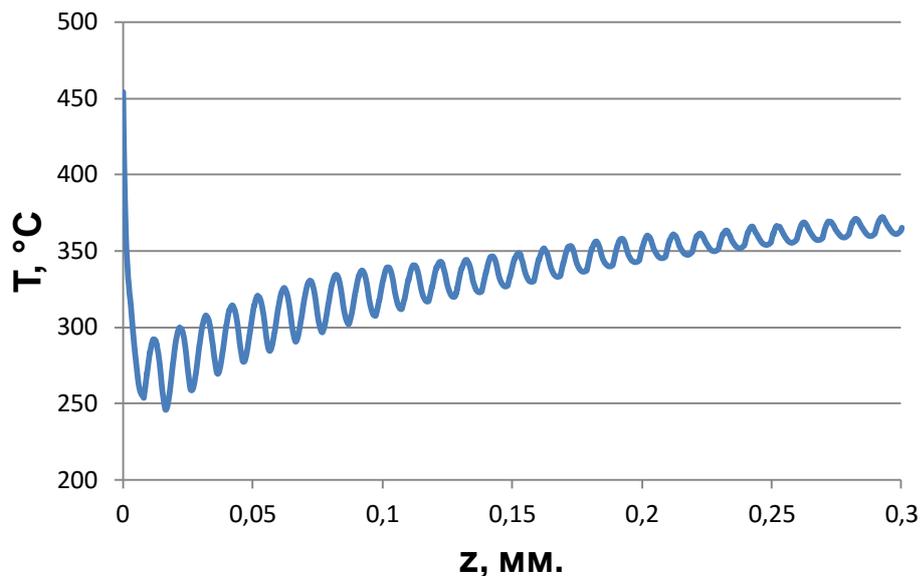


Рис.7. Изменение температурного поля со временем

В частности, в данной модели большая величина осадки приводит к тому, что начиная с момента времени $t = 0.13$ с., грат начинает контактировать с кромками оснастки, которые в значительной мере искажают его форму. Особенно хорошо это видно в момент времени $t = 0.13$ с.: толщина грата минимальная вблизи образцов и увеличивается по мере удаления от них. Это обусловлено уменьшением зазора между оснастками, через который выдавливается материал. Максимальное значение температуры также не превышает $T_{\text{кон}} = 380^{\circ}\text{C}$, не смотря на то, что ширина зоны материала, прогретого до высокой температуры, увеличилась.

Следует отметить, что наблюдаемая картина совпадает с экспериментальными данными, опубликованными ранее [8]

Кроме двухмерных моделей были построены и трехмерные модели сварки не только стандартных прямоугольных образцов, но также и образцов, чья геометрия достаточно хорошо приближена к реальности. В частности, на Рис.8. показан внешний вид модели равновесной стадии ЛСТ для имитатора лопатки блиска ГТД. Эти модели являются достаточно тяжеловесными, и расчет только одной модели при текущих лицензионных условиях на имеющемся оборудовании требует от одной до трех недель, тогда как время расчета двухмерных моделей около 36 часов.

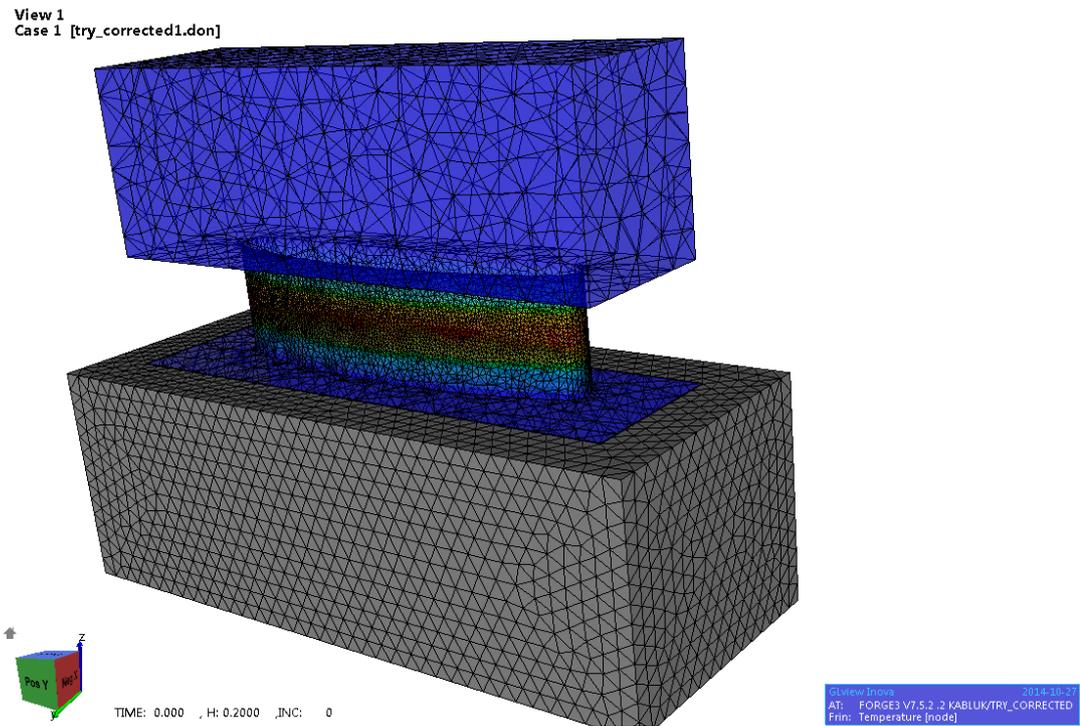


Рис.8. 3D модель сварки имитатора лопатки в пакет Transvalor FORGE.

Модель упругих стадий процесса ЛСТ, с учетом зажима, в пакете Abaqus

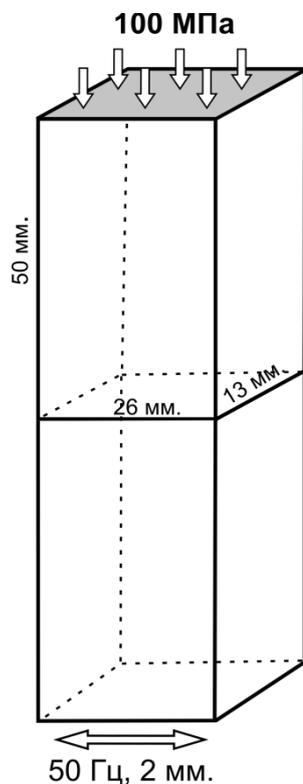


Рис.9. Геометрия 3D-модели.

Рассматривается процесс линейной сварки трением образцов в виде прямоугольных параллелепипедов (см.Рис.9). Ввиду того, что части образцов, выступающие из оснастки, содержат области, вступающие в контакт и прилегающие к зоне сварки, в этих областях каждого из образцов была построена сетка с характерным размером элементов в 10 раз меньше, чем в области, находящейся в зажиме.

Для крепления используется болтовая оснастка (см.Рис.10). Верхний образец, к верхней грани которого приложено давление, может перемещаться только вдоль вертикальной оси. Нижний образец совершает возвратно-поступательное движение вдоль горизонтальной оси (оси Ox) по закону синуса с частотой f и амплитудой a . Время моделирования 0,2 с., что сравнимо со временем подготовительной фазы.

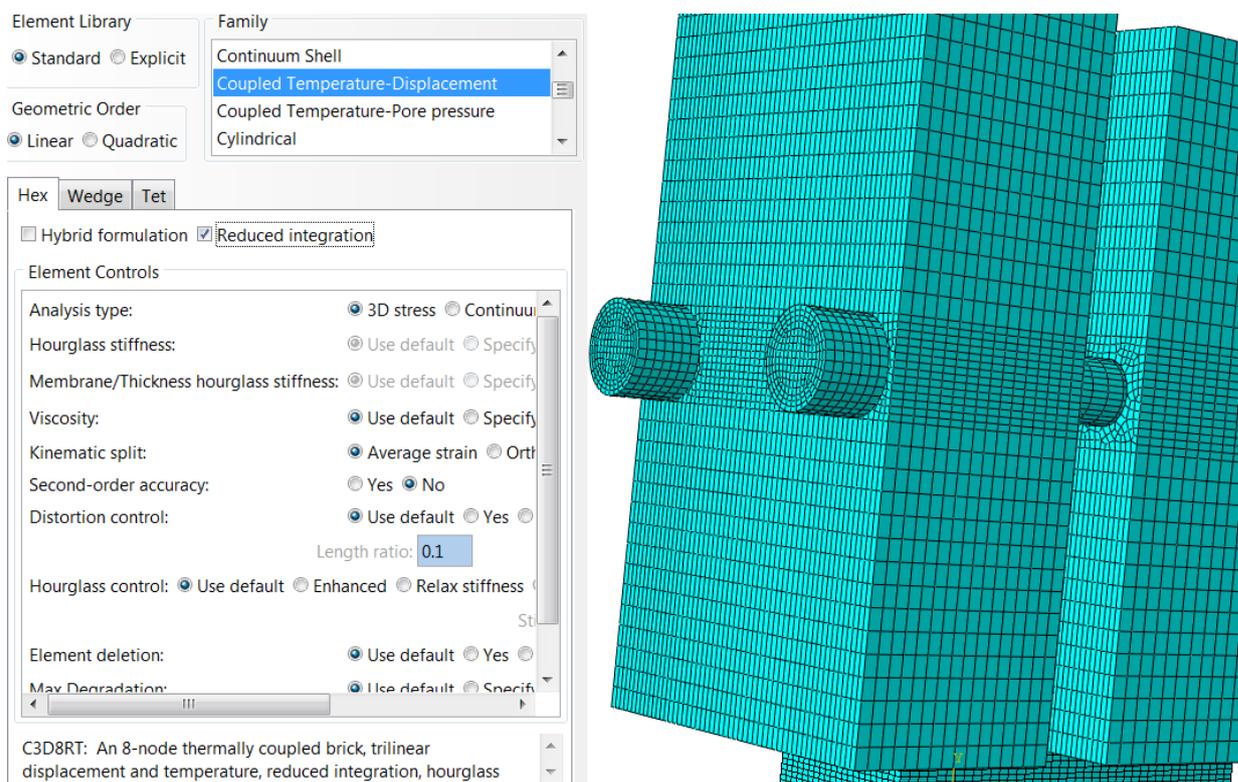


Рис. 10. Окно определения параметров расчетной сетки (слева) и часть оснастки с построенной расчетной сеткой (справа).

Целью моделирования является проверка гипотезы о том, что разница в преднапряженном состоянии образцов приводит к неоднородному упрочнению материала, и, как следствие, к различной картине пластических деформаций каждого из образцов.

На рис.11 приведены результаты расчетов, когда к верхнему образцу приложено сжимающее боковое давление, имитирующее зажим в оснастке, в два раза большее, чем к нижнему. Из рисунка видно, что выдвинутая гипотеза находит подтверждение.

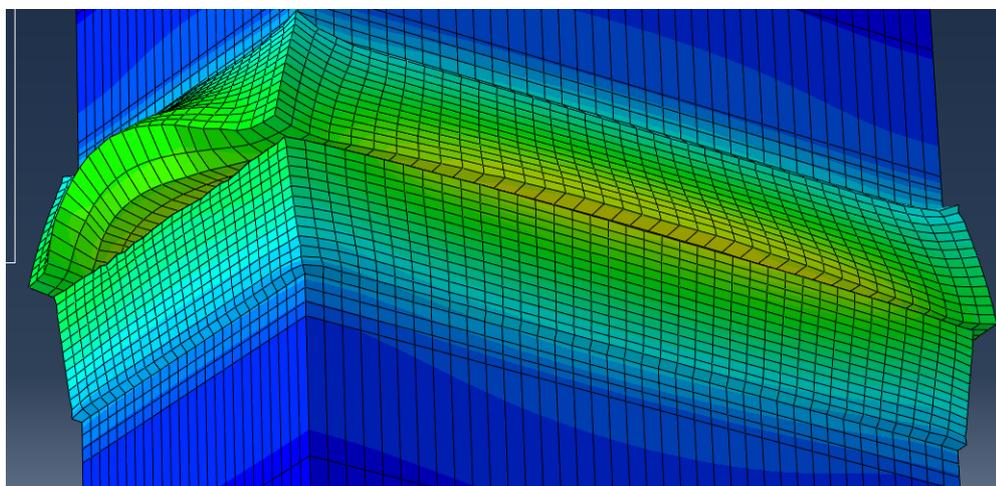


Рис.11. Внешний вид образцов спустя $t = 0,2$ с.

Заключение

В результате работ по изучению процесса линейной сварки трением было построено несколько моделей процесс ЛСТ в инженерных пакетах: ANSYS, Simulia Abaqus и Transvalor FORGE – использующих сильные стороны каждого из них. Результаты моделирования использовались для разработки технологических процессов получения блисков современных ГТД из титановых и алюминиевых сплавов.

Список литературы

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. Биля. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 236 с.
2. 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.
3. А.Т. Бикмеев, Р.К. Газизов, В.Ю. Иванов, А.А. Касаткин, В.В. Латыш, С.Ю. Лукашук, И.Ш. Насибуллаев, К.Р. Юлмухаметов, А.М. Ямилева. Анализ эффективности распараллеливания решателей ANSYS Multiphysics при моделировании процесса линейной сварки трением // «Вестник Южно-Уральского государственного университета» №25 (242). Серия «Математическое моделирование и программирование», вып. 9. 2011. - с. 64-75.
4. А.Т. Bikmeyer, А.М. Yamileva, А. Vairis, R.K. Gazizov Mathematical and Numerical Models of the Preliminary Phases of the Linear Friction Welding Process // Proceedings of the International Joint Symposium on Joining and Welding IJS-JW 2013, 6-8 November, 2013, Osaka, Japan, p.299-304.
5. А. Yamileva, А. Chukalova, А. Bikmeyer and R. Gazizov Effect of Process Parameters on Friction Model in Computer Simulation of Linear Friction Welding // Journal of Engineering Science and Technology Review 7 (5) (2014). p.59-61. Special Issue on Simulation of Manufacturing Technologies
6. R.Turner,R.M.Ward,R.March,andR.C.Reed,“The magnitude and origin of residual stress in Ti-6Al-4V linear friction welds: an investigation by validated numerical modeling,” Metallurgical and Materials Transactions B,vol.43,no.1,pp. 186–197, 2012.
7. F. Schroeder, R. M. Ward, R. Turner, M. M. Attallah, J.-C. Gebelin, and R. C. Reed, “Linear friction welding of titanium alloys for aeroengine applications: modelling and validation,” in Proceedings of the 9th International Trends in Welding Research Conference, 2012.
8. Pedro Vilaçal, João Gandra and Catarina Vidal Linear Friction Based Processing Technologies for Aluminum Alloys: Surfacing, Stir Welding and Stir Channeling // Chapter 7 in book Aluminium Alloys - New Trends in Fabrication and Applications. InTech 2012. – pp.161-198.