

# Суперкомпьютерные технологии для моделирования процесса линейной сварки трением



## 4 Суперкомпьютерные технологии для моделирования процесса линейной сварки трением

Линейная сварка трением — это технология получения неразъемных соединений, активно внедряемая на предприятиях аэрокосмической отрасли по всему миру. Определение наиболее оптимальных режимов проведения сварки требует предварительного математического и компьютерного моделирования. Поскольку сам процесс протекает достаточно быстро (порядка двух секунд), и при этом температура в зоне контакта достигает 1000°С и выше, то для проведения моделирования необходимо привлечение высокопроизводительных вычислительных ресурсов.

### АВТОРЫ:

**Р.К. Газизов** – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой высокопроизводительных вычислительных технологий и систем ФГБОУ ВПО «УГАТУ»,  
e-mail: gazizov@mail.rb.ru

**М.Б. Гузаиров** – докт. тех. наук, проф., ректор ФГБОУ ВПО «УГАТУ»,  
e-mail: guzairov@rb.ru

**В.Ю. Иванов** – канд. тех. наук, зам. управляющего директора, ОАО «УМПО»,  
e-mail: ivanov.vladimir@umpo.ru

**В.В. Латыш** – директор, канд. тех. наук, Технопарк АТ,  
e-mail: latysh-vv@mail.ru

**С.П. Павличич** – докт. тех. наук, зам. управляющего директора – технич. директор, ОАО «УМПО».

### Введение

Сварка трением — разновидность сварки давлением, при которой нагрев осуществляется трением, вызванным перемещением друг относительно друга соединяемых частей свариваемого изделия. Благодаря тому, что в процессе трения тепловыделение локализовано в тонких приповерхностных слоях металла, т.е. именно там, где это и требуется, такая сварка обладает рядом важных достоинств:

- высокая производительность — полный цикл сварки длится всего от одной до несколько секунд;
- малое потребление энергии — в процессе сварки материал не достигает точки плавления, и при этом прогревается только небольшая область вблизи плоскости контакта свариваемых частей;
- высокое качество сварного шва (ультрамелкозернистая микроструктура, отсутствие пористости, минимальные деформации) и стабильность качества сварных соединений;
- возможность сварки металлов и сплавов в различных сочетаниях и с необработанными поверхностями;
- гигиеничность процесса (отсутствие ультрафиолетового излучения, вредных газовых выделений, горячих брызг металла и т.д.);
- простота механизации и автоматизации.

Интересна история изобретения сварки трением [1]. 28 августа 1956 г. в газете «Труд» было опубликовано письмо токаря Эльбрусского рудника А.И. Чудикова: «Я разработал способ сварки методом трения. На нашем руднике это новшество нашло широкое распространение. Посланное в Министерство цветной металлургии предложение вернулось с резолюцией — метод не годится».

Во Всесоюзном научно-исследовательском институте электросварочного оборудования (ВНИИЭСО), как тогда назывался Институт сварки России, это письмо привлекло внимание начальника отдела научно-технической информации Ю.Я. Терентьева, который и выступил инициатором начала исследований по этой теме. Уже первые эксперименты, проведенные сотрудниками института В.И. Виллем и Л.А. Штерниным, показали, что такие особенности процесса, как малая энергоемкость, высокие КПД, производительность, качество соединений и относительная простота оборудования, определяют несомненную рациональность промышленного применения сварки изделий трением, если одна из деталей является телом вращения. Все это и послужило толчком к началу многолетних научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ по этому процессу.

## Линейная сварка трением

Наиболее распространенные и разработанные способы сварки трением на сегодняшний день — ротационная сварка и перемешивающая сварка трением. Менее изученной остается линейная сварка трением (ЛСТ), хотя она в последнее время становится ключевой технологией формирования сварных соединений из трудносвариваемых материалов.

В процессе возвратно-поступательного движения с частотой порядка 60 Гц и амплитудой до 3-х мм части, подлежащие свариванию, прижимаются друг к другу до образования плотного контакта. Генерируемая в плоскости сварки теплота способствует нагреву и пластической деформации приповерхностных объемов свариваемых материалов. В процессе сварки вязко-пластичные слои металла перемещаются к границам свариваемых поверхностей. При этом происходит удаление окислов и загрязнений, которые могут присутствовать в зоне сварки, что позволяет снизить требования к предварительной подготовке свариваемых поверхностей. Другим достоинством процесса ЛСТ является короткая длительность процесса сварки, что обеспечивает малую зону термического влияния и способствует сохранению свойств свариваемых материалов. Вместе с тем, высокие давления и скорости, сопровождающие процесс ЛСТ, налагают дополнительные требования к мероприятиям, способствующим устранению

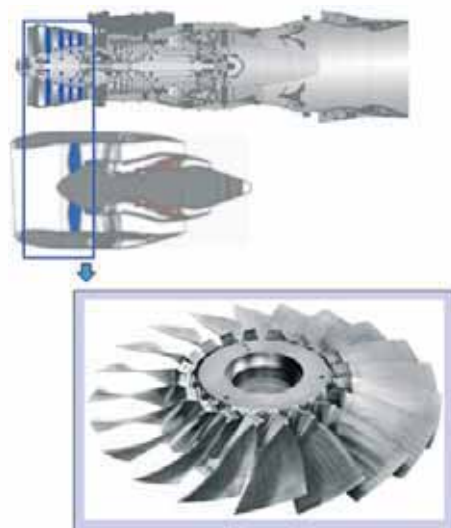


Рис. 1. Блисковые конструкции в ГТД различного типа

перекосов и погрешностей расположения свариваемых поверхностей.

Линейная сварка трением успешно применяется в авиадвигателестроении для соединения лопаток с дисками (получения так называемых блисков, рис. 1). Ее используют также ведущие машиностроительные компании, такие как Rolls Royce, MTU Engines, Pratt & Whitney, Boeing. Помимо изготовления новых изделий, перспективным является использование ЛСТ в ремонтном производстве.

В России работы по внедрению технологии ЛСТ для создания авиационных двигателей нового поколения в настоящее время проводятся на



Рис. 2. Оборудование экспериментального участка ЛСТ на ОАО «УМПО»



Рис. 3. Имитатор секции блиска после сварки

ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» (УМПО). С этой целью на предприятии создан экспериментальный участок ЛСТ (рис. 2), оборудование для которого поставила французская компания АСВ. На этом участке происходит отработка новой технологии, в частности, при сварке металлических брусков и имитаторов секции блиска (рис. 3).

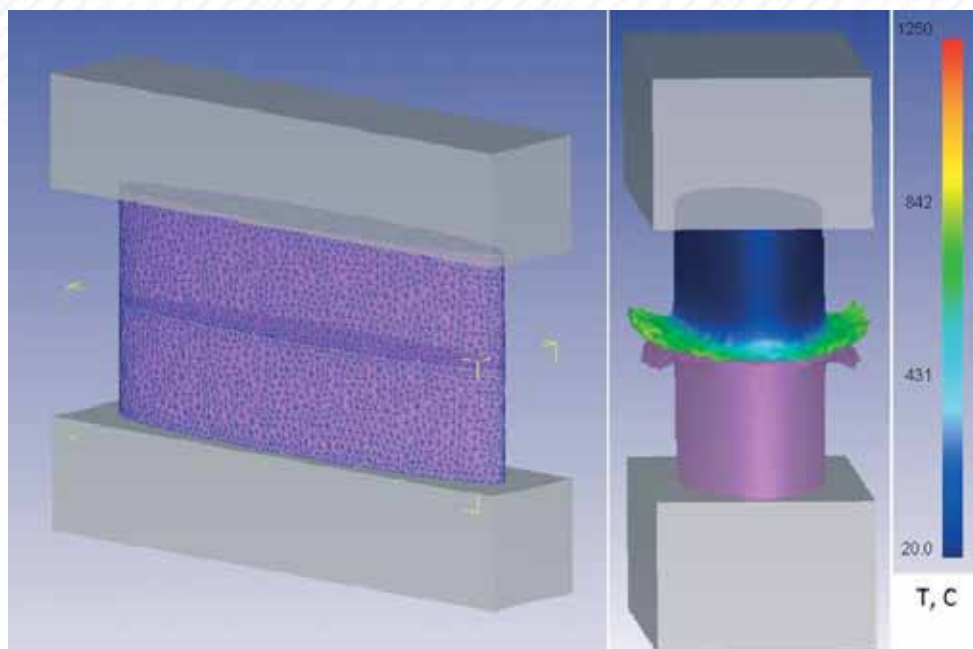
В рамках постановления № 218 правительства РФ от 09.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» реализуется

проект «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток газотурбинных двигателей с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений». Одной из составляющих этого проекта являются исследования процессов ЛСТ с использованием методов компьютерного моделирования, проводимые сотрудниками ОАО «УМПО» и ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ).

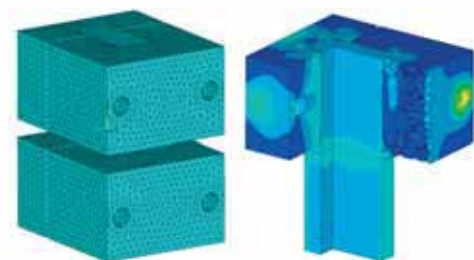
## Моделирование процесса ЛСТ

Математическое моделирование процесса линейной сварки трением из-за сложности и высокой интенсивности физико-химических процессов, сопровождающих сварку, представляет собой достаточно нетривиальную задачу. Одним из основных факторов сложности моделирования является необходимость учета макроскопических размеров изготавливаемых деталей и микроскопических явлений в зоне контакта.

Для моделирования данной задачи необходимы значительные вычислительные ресурсы, что исключает использование обычных ПК и приводит к необходимости использования суперкомпьютерных технологий.



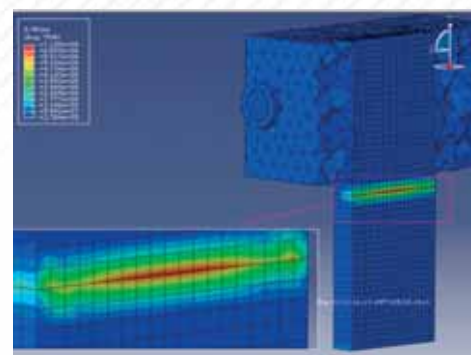
**Рис. 4.** Результаты моделирования процесса ЛСТ в пакете Deform 3D. Сеточная модель (слева) и распределение температуры в образцах (справа)



**Рис. 5.** Результаты моделирования процесса ЛСТ в пакете ANSYS Mechanical. Сеточная модель (слева) и распределение напряжения (справа) образцов в зажиме

на распределение напряжений (рис. 5) и распределение остаточных напряжений после процесса сварки (рис. 6) [2]. Рассматриваемые модели позволяют

В рамках выполнения проекта моделирование процесса ЛСТ проводится на суперкомпьютере УГАТУ с использованием инженерных пакетов Deform 3D, SIMULIA Abaqus и ANSYS Mechanical. Выделяются две стадии процесса моделирования: моделирование стадии упругих деформаций исследуемых образцов и стадии пластических деформаций. При этом решаются задачи анализа образования грата (выделение материала из области контакта, рис. 4), влияния зажима



**Рис. 6.** Результаты моделирования процесса ЛСТ в пакете SIMULIA Abaqus. Распределение остаточных напряжений в области сварного соединения

построить поля температур, напряжений и деформаций в процессе ЛСТ, исследовать длительность стадий ЛСТ для различных параметров процесса, а также описать поля остаточных напряжений. Результаты моделирования могут использоваться для оценки качества полученного сварного соединения и определения оптимальных режимов сварки в зависимости от геометрии свариваемых поверхностей и используемых материалов.

Отметим, что даже стандартный расчет упругой стадии процесса ЛСТ (примерно 0,2 секунды) сводится к решению систем полумиллиона алгебраических уравнений и на 12 четырехъядерных узлах длится в среднем 80 часов. Построение полной модели требует существенно больших ресурсов.

Решение систем полумиллиона алгебраических уравнений и на 12 четырехъядерных узлах длится в среднем 80 часов. Построение полной модели требует существенно больших ресурсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нюансы сварки трением [Электронный ресурс] // Портал «Обработка металла». – Режим доступа: <http://ostmetal.info/nyuansy-svarki-treniem/>
2. Бикмеев А.Т., Газизов Р.К. и др. Анализ эффективности распараллеливания решателей пакета ANSYS Multiphysics при моделировании процесса линейной сварки трением // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – Сер. «Математическое моделирование и программирование». – № 25 (242). – Вып. 9. – 2011. – С. 64–75.