

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

Смелянский Роман Игоревич

**Математическое моделирование точечной сварки трением с
перемешиванием тонких листов алюминиевых сплавов**

Направление подготовки 22.06.01 Технологии материалов

Код и наименование

Направленность _04 (05.16.05) Обработка металлов давлением

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Смелянский Роман Игоревич
Научный руководитель: доц., к.т.н., Наумов
Антон Алексеевич

Санкт Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе физики и технологий материалов Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: *Семенча Александр Вячеславович*
к.х.н., доцент

Научный руководитель: *Наумов Антон Алексеевич*
к.т.н., доцент

Рецензент: *Шаболдо Олег Павлович*
к.т.н., зам. директора по научной
работе ЦНИИМ

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

С каждым годом возрастает потребность в разработке легких конструкций для многих отраслей промышленности, в том числе авиастроения, космической промышленности и автомобилестроения, в которых вес элементов играет одно из ключевых значений. Инновационная технология соединения подобного рода конструкций – это точечная сварка трением с перемешиванием (ТСТП). Формирование соединения при ТСТП происходит без расплавления в твердой фазе. При этом нет необходимости в использовании присадочных материалов, отсутствуют выделения вредных веществ в атмосферу. Соединения, полученные данным методом, имеют высокие механические и усталостные характеристики.

Однако, несмотря на многочисленные преимущества метода ТСТП существует ряд факторов, ограничивающих его применение, главным из которых является сложность подбора технологического режима сварки. Недостаточная изученность точечной сварки трением с перемешиванием наряду с отсутствием математических моделей процесса и, как следствие, невозможностью прогнозирования свойств изделий, обуславливает актуальность темы данной работы.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является разработка трехмерной конечно-элементной термомеханической модели точечной сварки трением с перемешиванием с последующим анализом полученных результатов и сравнением с экспериментальными данными.

Для реализации цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Исследование основных подходов к решению задач моделирования высоких степеней деформаций с сильными искажениями конечно-элементной сетки.

- 2) Разработка термомеханической модели ТСТП с использованием ALE и CEL подходов.
- 3) Разработка методов повышения эффективности вычислений сложных термомеханических моделей
- 4) Анализ полученных результатов, сравнение их с экспериментальными данными.

Научная новизна

Впервые разработана термомеханическая математическая модель точечной сварки трением с перемешиванием, определены температурные и деформационные параметры при реальном процессе ТСТП, а также произведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты, изложенные в диссертации, вносят вклад в развитие математического моделирования технологических процессов, связанных с высокими степенями деформаций. Приведены различные подходы к построению термомеханических конечно-элементных моделей при ТСТП, показано сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, показаны методы по значительному ускорению вычислений при моделировании термомеханических задач.

Апробация работы

Результаты работы доложены и обсуждены на российских и международных конференциях: II Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Современные проблемы материаловедения» (Липецк, 2021), Materials Science & Technology 2020 Conference (USA, Pittsburgh, 2020).

Публикации

1) Наумов А.А., Ожегов М.А., Смелянский Р.И., А. Алали Алхалаф, Поляков П.Ю. Физико-механические процессы соединения тонких листов алюминия при сварке трением с перемешиванием встык. Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 2. С. 88–102.

2) Mikhail A. Ozhegov, Fedor Yu. Isupov, and Roman I. Smelianskii. Temperature Distribution During Friction Stir Spot Welding of Thin AA 6082-T6 and AA 5082-O Sheets. Friction Stir Welding and Processing XI. pp. 209-217

3) Ожегов М.А., Смелянский Р.И. Распределение температур в процессе точечной сварки трением с перемешиванием алюминиевого сплава Аmg5M. Современные проблемы материаловедения: сб. научных трудов Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2021. С. 26-30.

Представление научного доклада: основные положения

- 1) Исследование основных подходов к решению задач моделирования высоких степеней деформаций с сильными искажениями конечно-элементной сетки.
- 2) Разработка термомеханической модели ТСТП с использованием ALE и CEL подходов.
- 3) Разработка методов повышения эффективности вычислений сложных термомеханических моделей
- 4) Анализ полученных результатов, сравнение их с экспериментальными данными.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Технология точечной сварки трением с перемешиванием заключается в погружении нерасходуемого вращающегося инструмента со специально разработанным пином и заплечиком в соединяемые детали и выдержке в течение определенного периода времени. В процессе вращения инструмента

за счет пластической деформации в зоне перемешивания и контактного трения между инструментом и заготовкой выделяется тепло.

ТСТП – это довольно сложный, с точки зрения физических явлений, процесс, включающий в себя большие пластические деформации, течение материала, механическое перемешивание, поверхностное взаимодействие между инструментом и заготовкой, динамическую эволюцию структуры и выделение тепла в результате трения и пластической деформации.

Разработка термомеханических моделей сложных технологических процессов, к которым относится точечная сварка трением с перемешиванием, представляет довольно нетривиальную задачу, поскольку высокие степени деформаций вызывают чрезмерное искажение конечно-элементной сетки.

Термомеханические конечно-элементные модели можно разделить на два типа: модели на основе вычислительной механики твердого тела и модели на основе вычислительной гидродинамики. Для моделей первого типа обычно используется формулировка Лагранжа, а для моделей второго типа – формулировка Эйлера.

Подход Лагранжа задает движение континуума как функцию материальных координат и времени. Метод позволяет сетке и материалу перемещаться одновременно (рис.1а). Недостаток данного метода заключается в плохой сходимости задачи при больших искажениях элементов, поэтому при моделировании процесса ТСТП применение лагранжевого подхода невозможно.

Подход Эйлера (CEL) определяет движение континуума как функцию пространственной координаты и времени. Метод подразумевает перемещение материала через сетку, при этом искажений конечно-элементной сетки не возникает (рис.1б). В эйлеровом анализе эталонная сетка, которая остается неискаженной, необходима для отслеживания движения материала в эйлеровой области. Материал может свободно перемещаться через сетку. Для решения задач в эйлеровой постановке для исследуемой заготовки создается сетка Эйлера, которая должна немного превышать размеры самой заготовки.

В связи с этим, возникают сложности с заданием граничных условий. Кроме того, серьезными проблемами являются необходимость использования очень мелкой конечно-элементной сетки и невысокая вычислительная эффективность процесса, что приводит к длительным процессам расчетов, которые могут превышать несколько недель и даже месяцев.

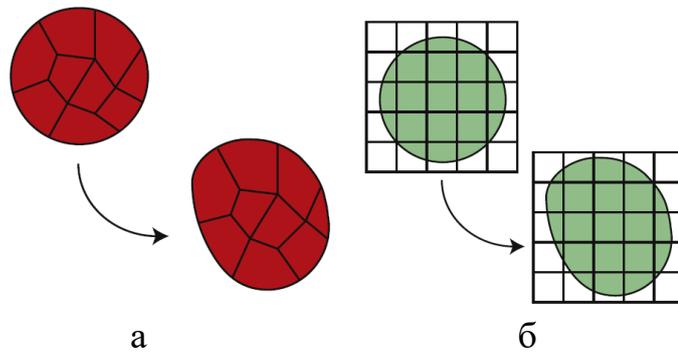


Рисунок 1. Деформация материальной среды: а – подход Лагранжа, б – подход Эйлера

В программном пакете ABAQUS существует также дополнительный способ вычислений задач, связанных с большими степенями деформаций - произвольный Лагранжево-Эйлеровый подход (Arbitrary Lagrangian-Eulerian - ALE), который объединяет преимущества как лагранжевого, так и эйлера анализов. В методе ALE узловые точки могут перемещаться произвольно, что позволяет материалу перемещаться независимо от сетки. Влияние ALE на контроль искажения сетки показано на рис. 2. Без использования метода ALE решение нестабильно и решатель прекращает расчеты из-за ошибки сильного искажения.



Рисунок 2. Влияние использования ALE на КЭ сетку

В большинстве случаев частота создания адаптивной сетки ALE является параметром, который больше всего влияет на качество и вычислительную эффективность адаптивной сетки. Во время каждого приращения адаптивного построения сетки создается новая сетка путем выполнения одной или нескольких разверток и последующего переноса переменных решения в новую сетку. В приращении адаптивной сетки создается новая, более гладкая сетка путем итеративного прохождения по области адаптивной сетки. Во время каждой развертки сетки узлы в домене перемещаются в зависимости от текущего положения соседних узлов и элементов, чтобы уменьшить искажение элементов. При типичной развертке узел перемещается на долю характерной длины любого элемента, окружающего узел. Увеличение количества разверток увеличивает интенсивность адаптивного построения сетки на каждом шаге адаптивного построения сетки.

Таким образом, в настоящей работе будут рассматриваться модели на основе подходов ALE и CEL.

Объекты, (предмет) и методы исследования

Объектом исследования был выбран алюминиевый сплав 6082-T6. Для анализа распределения температур и деформаций при помощи математического моделирования в программном пакете ABAQUS была разработана термомеханическая модель точечной сварки трением с перемешиванием с применением ALE и CEL подходов.

Результаты и их обсуждение

Конечно-элементная модель для процесса ТСТП была разработана в программном пакете ABAQUS. Для моделирования было решено использовать явный динамический анализ (Explicit dynamic analysis), который позволяет рассчитывать в модели большие вращения и деформации. Процедура явного динамического анализа основана на реализации явного

правила интегрирования вместе с использованием диагональных («сосредоточенных») матриц масс элементов.

Свариваемые заготовки были изготовлены из алюминиевого сплава 6082-T6, химический состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав алюминиевого сплава 6082-T6

Элемент	Al	Mg	Fe	Zn	Si	Mn	Cr	Cu	Ti
мас. %	95,2-98,3	0,6-1,2	0-0,5	0-0,2	0,7-1,3	0,4-1,0	0-0,25	0-0,1	0-0,1

Разработанная конечно-элементная модель при подходе ALE состоит из двух частей – заготовки и инструмента с вогнутым заплечиком (рис. 3, 4).

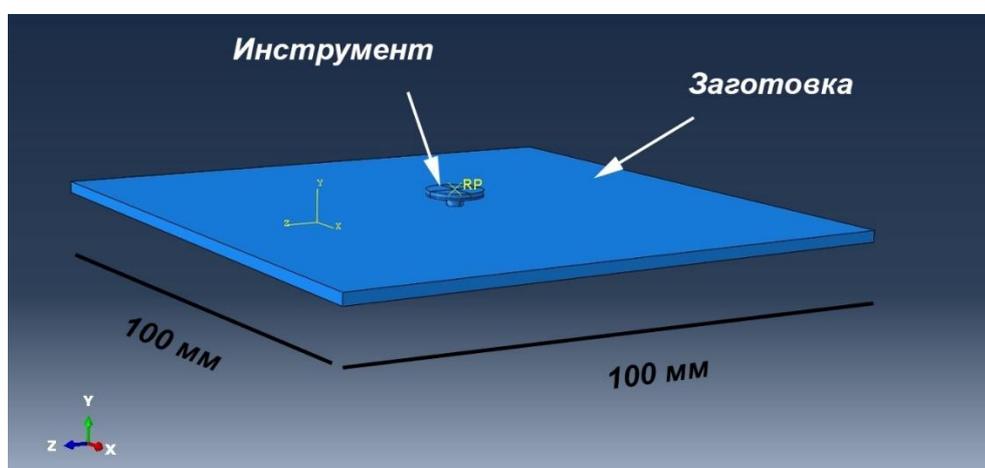


Рисунок 3. Сборка модели ТСП



Рисунок 4. Инструмент для ТСП с вогнутым заплечиком

В модели инструмент рассматривается как твердое тело. Диаметр заплечика составляет 10 мм, диаметр наконечника инструмента – 3 мм, а высота наконечника – 1,63 мм. Заготовка представляет собой лист с размерами 100 x 100 x 2 мм.

Конечно-элементная сетка модели состоит из 316507 элементов и 378978 узлов, как показано на рис. 5.

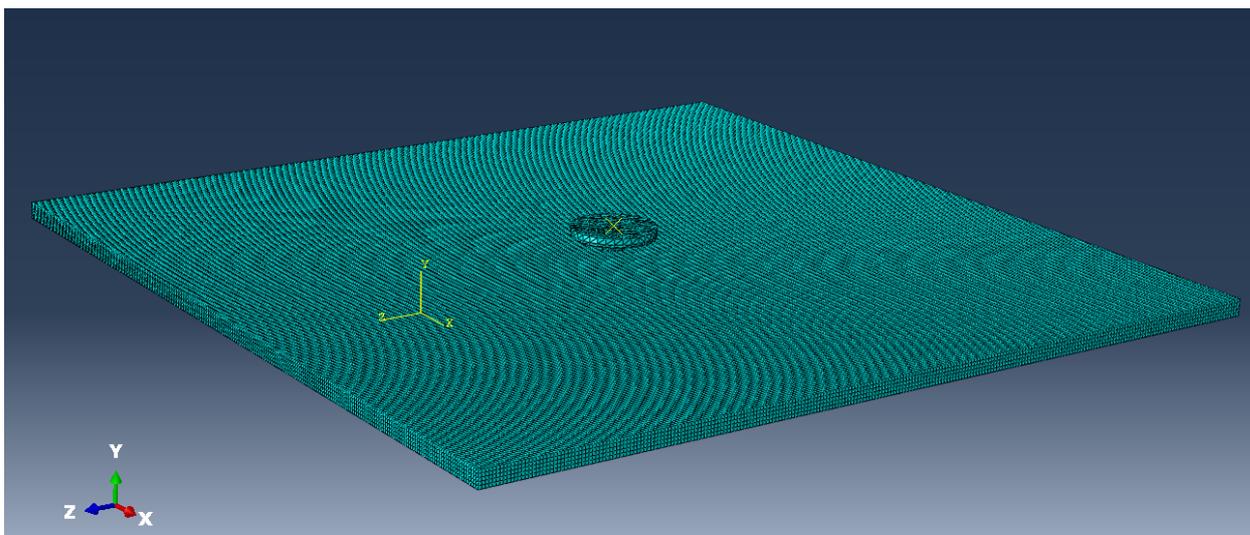


Рисунок 5. Конечно-элементная сетка модели ТСТП при методе ALE

Для заготовки используются 8-узловые термосвязанные элементы типа C3D8RT – с трехмерным смещением и уменьшенной интеграцией. Сетка инструмента ввиду сложной геометрии задавалась с помощью термосвязанных элементов типа C3D4T.

В текущем исследовании для описания пластических свойств материала использовалась модель Джонсона-Кука, зависящая от температуры и скорости деформации. Модель описывается следующим уравнением:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{КОМН.}}}{T_{\text{ПЛ.}} - T_{\text{КОМН.}}} \right)^m \right], \quad (1)$$

где σ – предел текучести, ε – эффективная пластическая деформация,

$\dot{\varepsilon}$ – эффективная скорость пластической деформации, $\dot{\varepsilon}_0$ – эталонная скорость деформации, A , B , C , n , m – константы материала, $T_{\text{КОМН.}}$ – комнатная температура, $T_{\text{ПЛ.}}$ – температура плавления.

Свойства алюминиевого сплава 6082-T6 для модели Джонсона-Кука приведены в таблице 2.

Таблица 2. Пластические свойства алюминиевого сплава 6082-Т6

A, МПа	B, МПа	n	c	T _{пл.} , °C	m
250	243,6	0,17	0,00747	582	1,31

Физические свойства материала заготовки приведены в таблице 3.

Таблица 3. Свойства алюминиевого сплава 6082-Т6

Температура, °C	Теплопроводность λ, Вт/м*К	Удельная теплоемкость C _p , Дж/кг*К	Коэффициент линейного расширения α, 10 ⁻⁶ /К	Плотность ρ, кг/м ³	Модуль Юнга E, ГПа	Коэффициент Пуассона
20	194,2	907,5	22,55	2699,0	69,7	0,3
50	201,3	919,8	22,87	2689,8		
100	208,5	932,1	23,42	2680,1		
150	215,6	944,4	23,96	2670,0		
200	222,7	956,8	24,50	2659,4		
250	229,9	969,1	25,05	2648,4		
300	237,0	981,4	25,59	2636,9		
350	244,2	993,7	26,13	2625,0		
400	251,3	1006,0	26,68	2612,7		
450	258,4	1018,3	27,22	2599,9		
500	265,6	1030,6	27,76	2586,7		

Свойства материала инструмента задавались для инструментальной стали Н13 и приведены в таблице 4.

Таблица 4. Свойства материала инструмента

Теплопроводность λ, Вт/м*К	Удельная теплоемкость C _p , Дж/кг*К	Плотность ρ, кг/м ³	Модуль Юнга E, ГПа	Коэффициент Пуассона
24,3	460	7800	210	0,3

Переходный процесс теплопередачи описывается следующей формулой:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала, c_p – удельная теплоемкость, k – теплопроводность (k_x , k_y , k_z – теплопроводность в направлениях x , y , z), T – абсолютная температура заготовки, Q – тепловыделение.

В качестве основного источника тепловых потерь в заготовке выступает, как правило, конвекция. Поверхности заготовки имеют теплопотери, которые рассчитываются по формуле:

$$q = h_{\text{конв.}}(T - T_{\text{окр.ср.}}), \quad (3)$$

где $h_{\text{конв.}}$ – коэффициент конвекции, T – абсолютная температура заготовки, $T_{\text{окр.ср.}}$ – температура окружающей среды.

Для процесса конвекции алюминия на воздухе используется коэффициент теплопередачи $h_{\text{конв.}}$, равный 30 Вт/м².

Разделение тепла между инструментом и заготовкой было определено на основе уравнения:

$$f_3 = \frac{\sqrt{(\lambda\rho c)_3}}{\sqrt{(\lambda\rho c)_3} + \sqrt{(\lambda\rho c)_и}}, \quad (4)$$

где f_3 – доля тепла, передаваемого заготовке, λ – коэффициент теплопроводности, c – удельная теплоемкость. Индексы $з$ и $и$ обозначают заготовку и инструмент соответственно.

Для расчета f_3 учитывались средние параметры при комнатной и максимальной температурах. Значение f_3 для настоящей работы было принято равным 0,72. Таким образом, 72 % общего тепла идет на заготовку, а оставшиеся 28 % - на инструмент.

Начальные температуры заготовки и инструмента составляют 25 °С.

Важной частью моделирования процесса ТСТП является моделирование состояния контакта между инструментом и заготовкой. В данной работе используется контакт типа surface-to-surface и модель трения Кулона, т.к. с ее использованием исследователями были получены более приближенные к экспериментальным результатам данные. Для описания трения применяется зависящий от температуры коэффициент трения, приведенный в таблице 5.

Таблица 5. Зависимость коэффициента трения от температуры

Температура, °С	Коэффициент трения
25	0,40
340	0,25
460	0,20
543	0,01

В качестве граничных условий, применяемых к заготовке используется ограничение ее нижней поверхности ($U_y = 0$), а также фиксация боковых граней по соответствующим направлениям, как показано на рисунке 6.

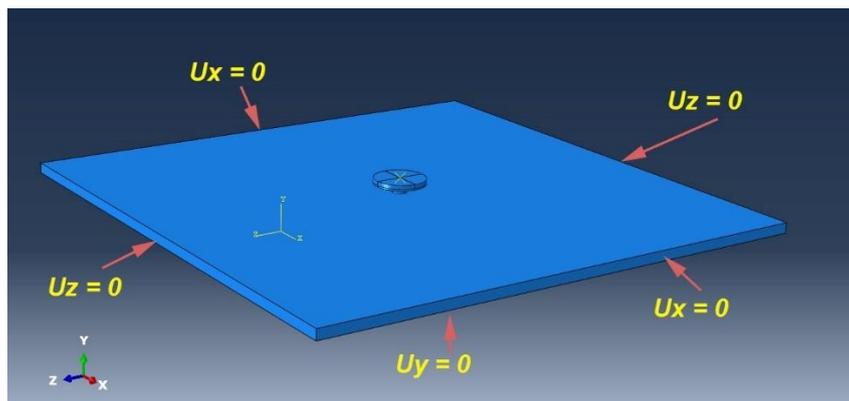


Рисунок 6. Граничные условия для КЭ модели

Моделирование ТСТП было разделено на 2 этапа – погружение и выдержка инструмента. На этапе погружения инструмент вращается и перемещается вертикально вниз. Во время выдержки инструмент продолжает вращаться, но остается в положении максимального погружения без дальнейшего перемещения. Погружение инструмента в заготовку происходило в течение 5 секунд, после которых осуществлялась выдержка в течение 5 секунд. Скорость вращения инструмента составляла 1000 об/мин. Инструмент погружался в заготовку на расстояние 1,8 мм.

В ходе попыток запуска расчетов было обнаружено, что решение термомеханической задачи ТСТП при создании не самой мелкой конечно-элементной сетки занимает огромное количество времени даже при использовании больших вычислительных мощностей. В связи с этим, была поставлена задача найти пути увеличения вычислительной эффективности расчетов без ущерба качеству получаемых результатов.

Существует несколько различных путей ускорения расчетов при моделировании. Одним из часто используемых методов является масштабирование по времени, которое обычно применяют только при решении стандартных механических задач – например, при моделировании процесса растяжения, изгиба и т.д. Техника масштабирования по времени заключается в том, что исходное время делится на произвольный коэффициент, например, 100, и вместо 1 секунды времени процесса в расчете применяется 0,01 секунды. Временное масштабирование не влияет на результаты моделирования, однако сильно ускоряет вычислительную эффективность.

При решении тепловой задачи в описании свойств материалов используются величины, напрямую зависящие от времени (например, теплопроводность). Поэтому применение метода временного масштабирования некорректно.

Стоит заметить, что уменьшение частоты вывода выходных величин практически не влияет на скорость расчетов.

При совместном решении термомеханической задачи как механические, так и термические расчеты имеют свое собственное стабильное приращение времени. Приращение стабильного времени определяется меньшим из двух. Время для стабильного механического приращения определяется следующим уравнением:

$$\Delta t_{\text{мех.}} = \frac{L_{\text{наим.}}}{c_{\text{д}}}, \quad (5)$$

где $L_{\text{наим.}}$ – длина наименьшего элемента, $c_{\text{д}}$ – скорость распространения волны расширения материала.

Скорость дилатационной волны, определяемая в линейно-упругом материале, определяется как:

$$c_{\text{д}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (6)$$

где E - модуль упругости, а ρ - плотность материала.

В данной работе исходя из модуля упругости и средних значений плотностей в зависимости от температуры получаем значение c_d , равное 5132,2 м/с. Наименьшая длина элемента – 0,0004 м. Таким образом, время для стабильного механического приращения составляет $7,8 \cdot 10^{-8}$ с.

Решение задачи моделирования ТСТП помимо механической части включает также термическую часть. Термостабильное приращение времени определим по формуле:

$$\Delta t_{\text{терм.}} = \frac{L_{\text{наим.}}^2}{2\alpha}, \quad (7)$$

где α - коэффициент температуропроводности материала.

Для алюминиевого сплава 6082-T6 значение α составляет приблизительно $7,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Таким образом, термическое стабильное приращение времени составляет $1,1 \cdot 10^{-3}$ с.

На основе расчетов временных приращений было определено, что расчет задачи потребует более 1150 часов для решения одной задачи. Чтобы избежать длительного времени вычислений в модели был использован метод массового масштабирования (mass scaling). Цель алгоритма масштабирования массы - искусственно увеличить плотность материала, чтобы увеличить время стабильного приращения. Массовое масштабирование не влияет на количество тепла, выделяемого при рассеянии пластической деформации и трения. Данная функция масштабирует массу по введенному пользователем коэффициенту, таким образом изменяя плотность и, следовательно, инерцию системы. Это замедляет скорость распространения дилатационной волны (уравнение 6) и увеличивает время стабильного приращения (уравнение 5), тем самым сокращая время вычислений.

Коэффициент масштабирования для решения задачи ТСТП был принят равным 10^6 . В результате время для стабильного механического приращения значительно сократилось и составило $7,8 \cdot 10^{-6}$ с.

При использовании коэффициента масштабирования необходимо убедиться в том, что изменение массы и последующее увеличение

инерционных сил не окажут существенного влияния на результаты. В программном пакете ABAQUS в ходе решения той или иной задачи следует следить за энергетическими параметрами модели, в особенности за кинетической (ALLKE) и внутренней энергиями (ALLIE). Важно, чтобы кинетическая энергия не составляла более 5 % от внутренней энергии. В настоящей работе также была проведена оценка корректности энергетических вычислений. На рис. 7 приведена зависимость кинетической и внутренней энергий в зависимости от времени для двух методов моделирования.

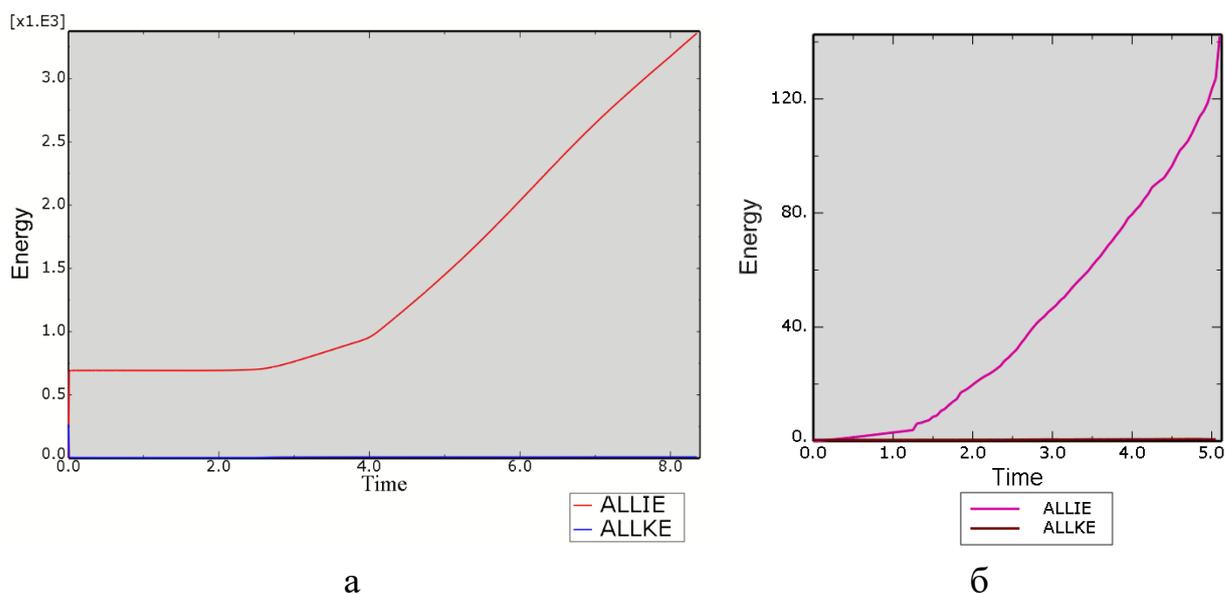


Рисунок 7. Распределение энергий при моделировании ТСТП:
а – при методе CEL, б – при методе ALE

Как видно из графиков, значения кинетической энергии системы не превышает 5 % от внутренней энергии. Таким образом, можно сделать вывод, что метод ускорения расчетов в виде масштабирования массы не оказывает влияния на результаты.

Кроме массового масштабирования, среди методов повышения эффективности расчетов можно выделить задействование большего количества ядер компьютера в вычислениях путем распараллеливания расчетов.

На рис. 8 показано, что и энергия трения (ALLFD), и энергия пластической диссипации (ALLPD) линейно возрастают со временем до полного контакта между инструментом и листом, после чего отмечается резкий скачок значения энергии трения. Это подтверждает реальность того факта, что трение отвечает за генерирование большей части тепла, необходимого во время моделирования ТСТП.

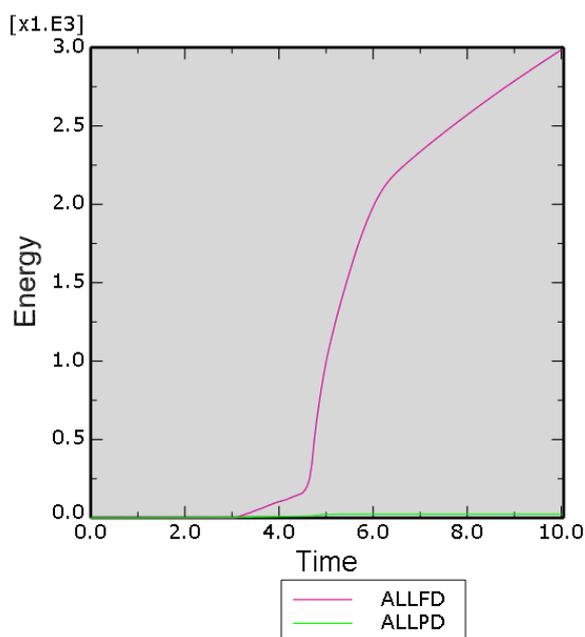


Рисунок 8. Распределение энергий трения и пластической диссипации

Сравнение результатов моделирования с экспериментально полученными данными проводилось для двух точек на заготовке, в которых находились термопары. Эти точки располагались на расстоянии 10 и 15 мм от центра заготовки (рис.9).



Рисунок 9. Расположение термопар при получении экспериментальных данных

Расчеты модели ТСТП при использовании метода ALE в ABAQUS были остановлены на 5 секунде из-за сильного искажения элементов. Попытки варьировать параметрами адаптивной сетки не привели к результатам. Таким образом, для ALE удалось провести моделирование лишь этапа погружения инструмента в заготовку. Вероятными причинами данной проблемы являются некие ограничения алгоритмов ALE, а также необходимость чрезвычайно мелкой конечно-элементной сетки.

На рис. 10, 11 показано распределение температур в заготовке на 5 секунде процесса.

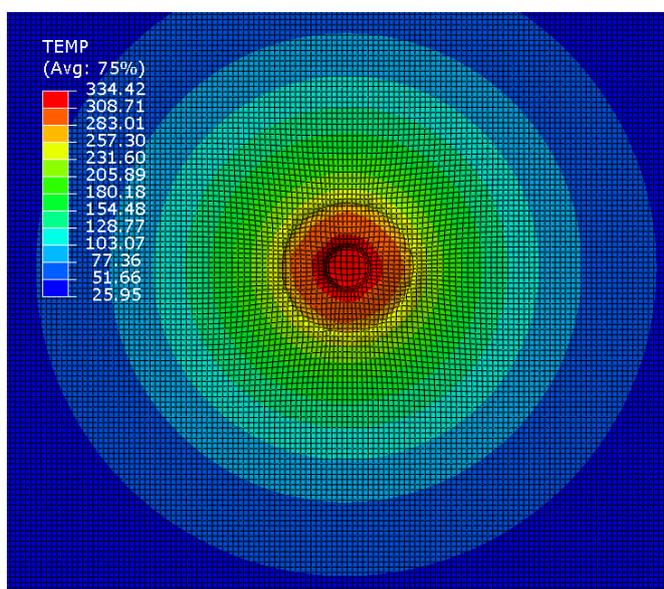


Рисунок 10. Распределение температур по заготовке на 5 секунде процесса ТСТП (вид сверху)

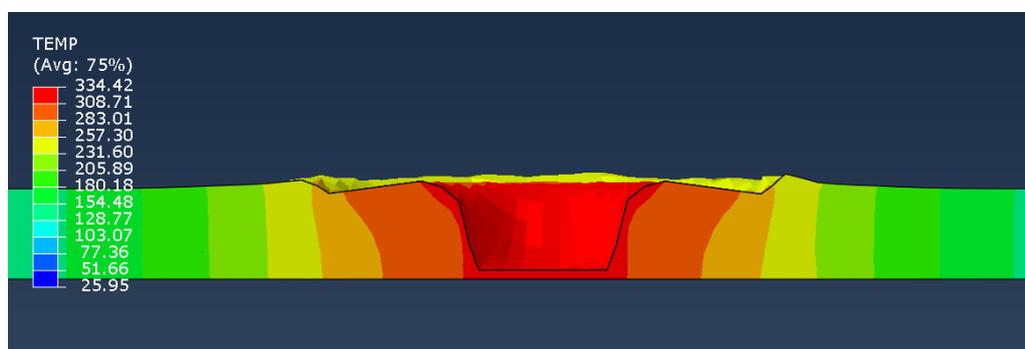


Рисунок 11. Распределение температур по заготовке на 5 секунде процесса (поперечное сечение)

Как видно из рисунков, температура равномерно распределяется по всей заготовке, максимальные значения которой находятся в месте непосредственного контакта наконечника инструмента с листами. Максимальное значение температуры составляет 334,4 °С.

На рис. 12 представлены графики распределения температур по времени в исследуемых точках, а также сравнение с полученными экспериментальными данными. Стоит отметить резкое увеличение температуры после контакта заплечика инструмента с заготовкой. При сравнении результатов эксперимента с результатами моделирования был сделан вывод о недостаточном тепловыделении при моделировании и плохой сходимости результатов.

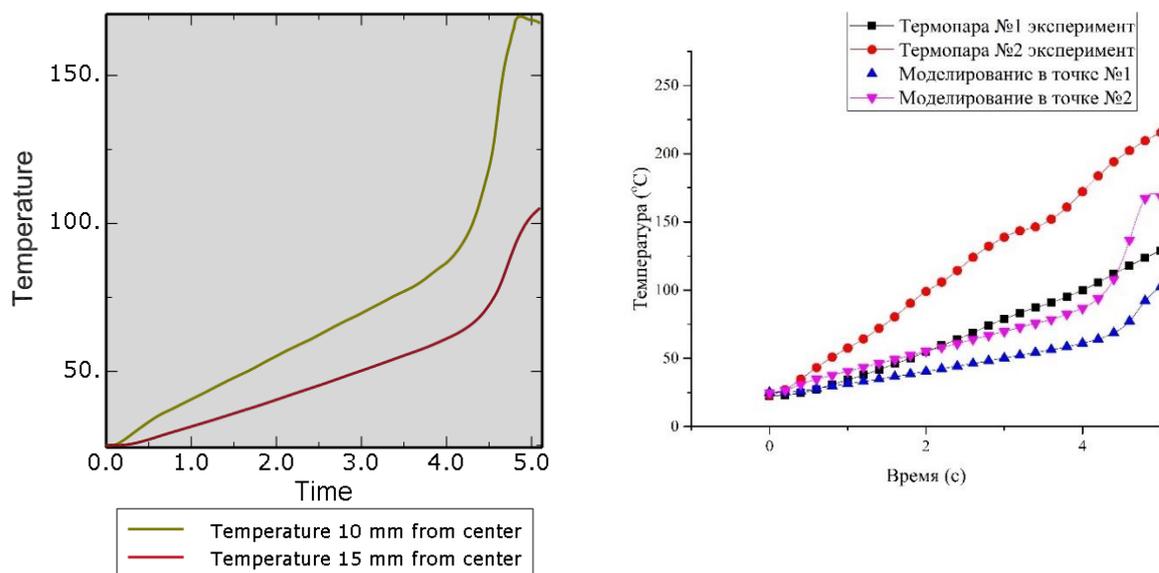


Рисунок 12. Распределение температуры со временем в заготовке и сравнение с экспериментальными данными

Кроме того, в модели, использующей формулировку ALE невозможно точно измерить температуру в конкретной точке. Это связано с алгоритмом адаптивного перестроения, который подтягивает сетку ближе к центральной части. Так, в настоящей модели расстояние от контрольной точки до центра сварки, которое изначально составляло 10 мм, в конце процесса погружения инструмента составляло уже 9,05 мм. Модели, построенные по методу CEL лишены такого важного недостатка.

В связи с описанными выше недостатками модели ALE и ошибкой, полученной из-за сильного искажения элементов, была разработана модели по методу CEL.

Конечно-элементная сетка модели ТСТП при методе CEL состоит из 55152 элементов и 55820 узлов и приведена на рис. 13.

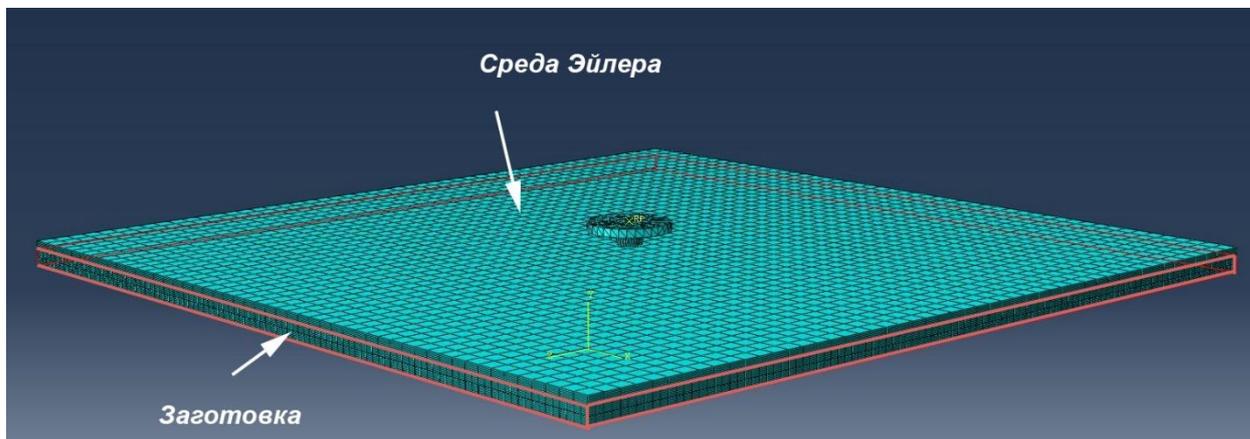


Рисунок 13. Конечно-элементная сетка модели ТСТП при методе CEL

Для описания среды Эйлера используются 8-узловые термосвязанные элементы типа EC3D8RT.

Применение сетки из расчета 1 элемент на 1 мм толщины при описанных выше параметрах задачи приводило к появлению отверстия в месте врезания инструмента в заготовку (рис.14). Следовательно, можно сделать вывод о необходимости использования как минимум 20 элементов по толщине листа (из расчета 1 элемент на 0,1 мм заготовки).

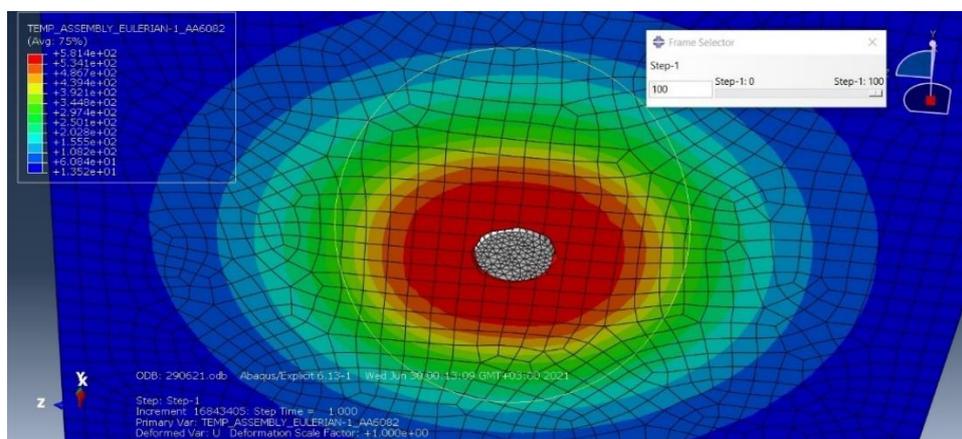


Рисунок 14. Дефект прорезания отверстия в конечно-элементной сетке заготовки

На рис.15 показано распределение температур в заготовке на 5 и 10 секундах процесса ТСТП.

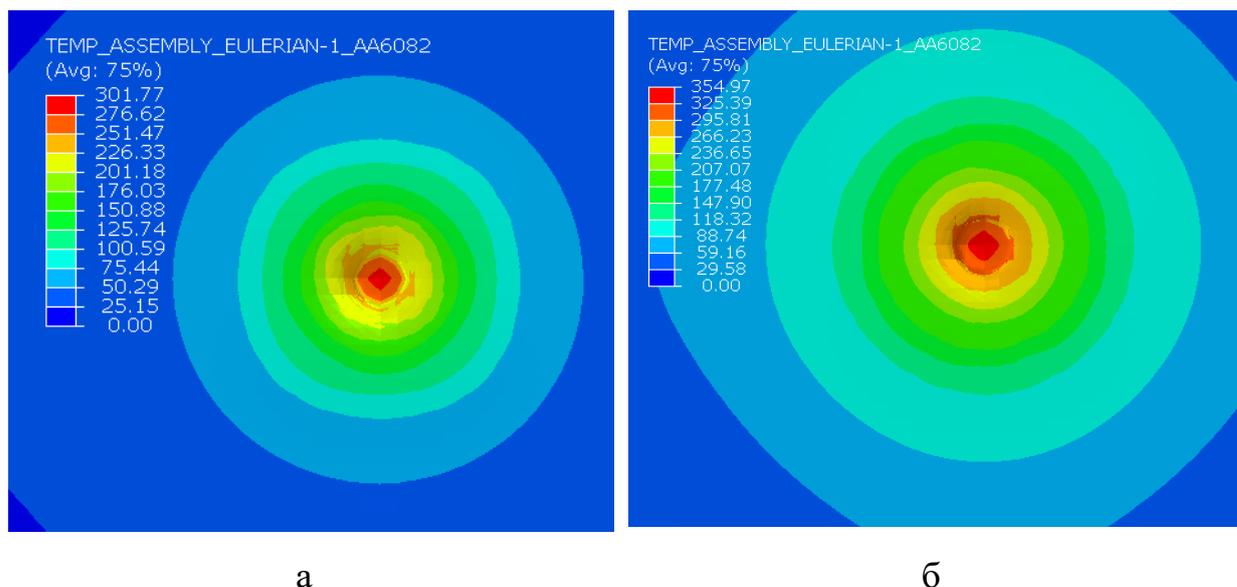


Рисунок 15. Распределение температур по заготовке со временем:
а – 5 секунд, б – 10 секунд

Поскольку при точечной сварке трением с перемешиванием в отличие от стандартной СТП нет поперечного перемещения инструмента, температура на этапах погружения и выдержки распространяется равномерно. Как указывалось ранее, инструмент остается в заготовке во время стадии выдержки, чтобы в достаточной степени нагреть материал заготовки. В результате пиковая температура на стадии выдержки выше, чем на стадии погружения.

На рис. 16 представлены графики распределения температур со временем в исследуемых точках, полученные экспериментально, а также с помощью математического моделирования. Как и при моделировании с формулировкой ALE, в подходе CEL заметно недостаточное тепловыделение при ТСТП. Возможно, это связано с недостаточно мелкой конечно-элементной сеткой, а также использованием для описания трения только кулоновского трения. В дальнейшем планируется использовать модифицированную модель трения с учетом процессов как прилипания, так и скольжения (с учетом сдвиговых напряжений). Кроме того, отклонения результатов моделирования

от экспериментальных данных можно связать с тем, что для описания свойств инструмента были заданы физические свойства, не зависящие от температуры.

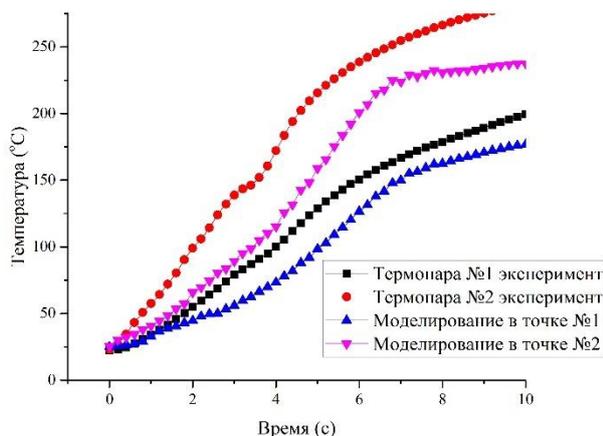


Рисунок 16. Распределение температуры со временем в заготовке

На рис. 17, 18 показаны распределения эквивалентных пластических деформаций (PEEQ) для каждого из методов моделирования: для метода ALE – на 5 секунде процесса, для метода CEL – на 5 и 10 секундах. Значение PEEQ = интегрированная мера пластической деформации для описания неупругого поведения материала.

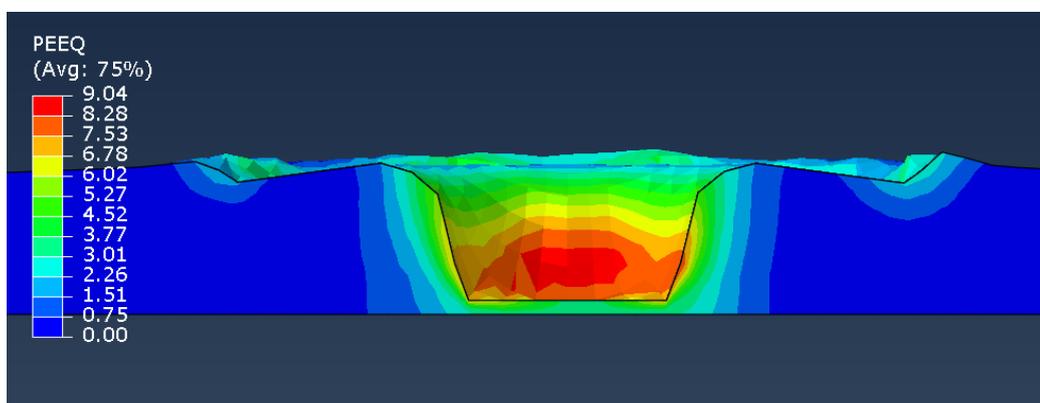


Рисунок 17. Распределение эквивалентных пластических деформаций при формулировке ALE

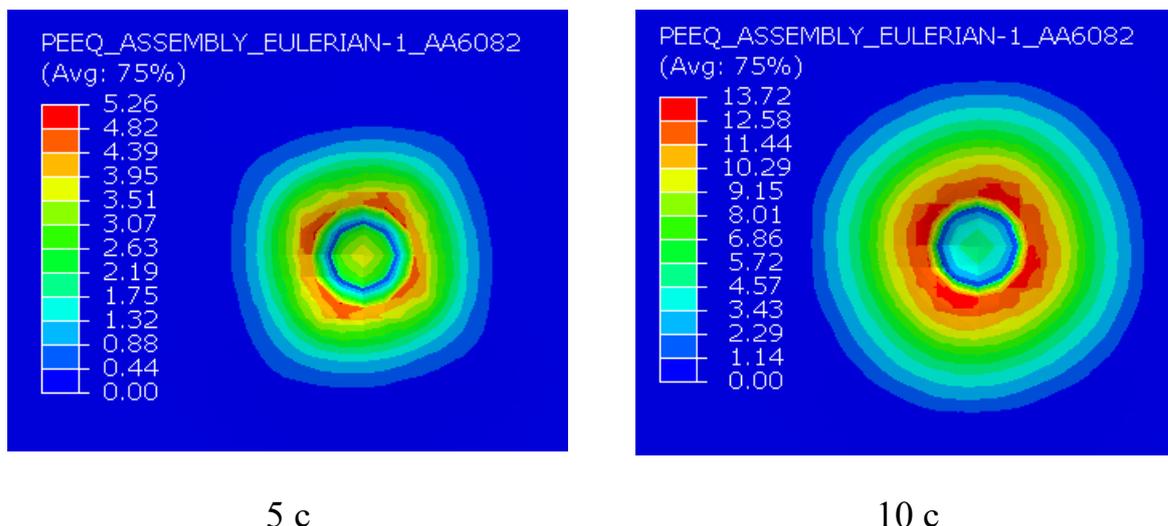


Рисунок 18. Распределение эквивалентных пластических деформаций при формулировке ALE

В модели, использующей формулировку ALE, значения PEEQ были выше на контактных поверхностях из-за метода контакта поверхность-поверхность. В модели, использующей формулировку CEL, несмотря на меньшие значения деформаций на контактных поверхностях, наблюдается распределение деформаций по большей площади. Очевидно, что контактный метод и недостаточно мелкая конечно-элементная сетка влияют на возникновение подобной ситуации.

Заключение

В результате настоящей работы была разработана трехмерная конечно-элементная термомеханическая модель точечной сварки трением с перемешиванием на основе двух подходов - ALE и CEL, позволяющих решать задачи с высокими степенями деформаций и сильными искажениями конечно-элементной сетки. Предложены методы повышения вычислительной эффективности при расчете сложных термомеханических моделей, произведена оценка влияния факторов ускорения на получаемые результаты.

Математическое моделирование при использовании метода ALE удалось завершить только для этапа погружения ввиду сильного искажения элементов. Изменение параметров адаптивной сетки не привело к

исправлению проблемы. Вероятными причинами этого являются ограничения алгоритмов ALE, а также необходимость применения чрезвычайно мелкой конечно-элементной сетки. При сравнении результатов распределения температур с экспериментальными данными для обоих методов сделан вывод о недостаточном тепловыделении при моделировании. Возможно, это связано с использованием только кулоновского трения для описания контакта между инструментом и листом. В дальнейшем планируется использовать модифицированную модель трения с учетом процессов как прилипания, так и скольжения с учетом сдвиговых напряжений. Кроме того, отклонения результатов моделирования от экспериментальных данных можно связать с тем, что для описания свойств инструмента были заданы физические свойства, не зависящие от температуры.

Будущие исследования будут направлены на доработку математических моделей точечной сварки трением с перемешиванием с учетом выводов по полученным результатам.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1) Наумов А.А., Ожегов М.А., Смелянский Р.И., А. Алали Алхалаф, Поляков П.Ю. Физико-механические процессы соединения тонких листов алюминия при сварке трением с перемешиванием встык. Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 2. С. 88–102.

2) Mikhail A. Ozhegov, Fedor Yu. Isupov, and Roman I. Smelianskii. Temperature Distribution During Friction Stir Spot Welding of Thin AA 6082-T6 and AA 5082-O Sheets. Friction Stir Welding and Processing XI. pp. 209-217

Публикации в других изданиях

Ожегов М.А., Смелянский Р.И. Распределение температур в процессе точечной сварки трением с перемешиванием алюминиевого сплава Амг5М. Современные проблемы материаловедения: сб. научных трудов

Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2021. С. 26-30.

Аспирант



Смелянский Роман Игоревич