

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В ПАКЕТЕ LS-DYNA

Кравчук А.С., Чашинский А.С., Баркалин В.В., Миклашевич И.А.,  
Юркевич С.Н., Случак П.А.

*A crush model of a weld joint was created in the paper.*

### Введение

Повышение надежности и долговечности машин и их элементов, являясь важнейшим фактором, определяющим рост конкурентоспособности изделий, связано с достоверным определением «опасных» мест конструкций. Наиболее эффективным и широко используемым средством достижения этой цели является использование математическое моделирование метода конечных элементов. В настоящее время существует достаточно много программных продуктов для решения широкого спектра задач определения прочности [1]. Одним из наиболее мощных программных средств решения задач разрушения конструкций является LS-Dyna [2].

В настоящее время накоплен достаточный опыт в определении прочности цельнометаллических конструкций. Поэтому основное внимание исследователей сосредоточено на разработке методик учета влияния локальных особенностей конструкции (мест с резко меняющейся кривизной поверхности, сварных швов, локальных неоднородностей и т.д.).

В работе излагается методика прочности сварного соединения. Предлагаемый подход основан на использовании «третьего тела» в качестве модели сварного шва с соответствующими геометрическими характеристиками. Этот подход хорошо зарекомендовал себя в различных прикладных исследованиях, например в трибологии. Он позволяет использовать индивидуальные механические характеристики сварного шва и определять их влияние на прочность изделия.

### Объект и цель исследования

В качестве объекта исследования, выбран восстановленный сваркой патрубок авиационного двигателя. Целью исследования является определение влияния механических и геометрических характеристик сварного шва, технологических отклонений (несоосности) частей патрубка, возникающих при проведении ремонта, на общую прочность детали.

### Механические свойства титана и его сплавов

Важнейшей особенностью титана и его сплавов являются его механические свойства: низкая плотность, высокая прочность, твердость и др. Занимая по удельной плотности промежуточное положение между алюминием и железом, титан по своим механическим свойствам во много раз их превосходит.

Объект исследования изготовлен из сплава титана ПТ-7М и обладает механическими свойствами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства титана

Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
116 000	0.32	382	480-667	20

## Построение твердотельной модели

В ходе предварительного анализа было установлено, что наиболее эффективным подходом при построении твердотельной модели является выделение фрагмента патрубка достаточной длины, чтобы характер закрепления торцов модели не сказывался на напряженно-деформированном состоянии сварного шва. Остальные части патрубка отбрасываются в связи с необходимостью сокращения затрат времени на проведение вычислительного эксперимента. В построенной модели оси свариваемых участков патрубка смещены друг относительно друга. Это имитирует погрешность позиционирования участков патрубка при сварке. Сварной шов между двумя участками патрубка моделируется криволинейным («третьим») телом, ширина которого определяется технологическими параметрами сварки (рис. 1).

LS-DYNA KEYWORD DECK BY LS-PRE  
Time = 0

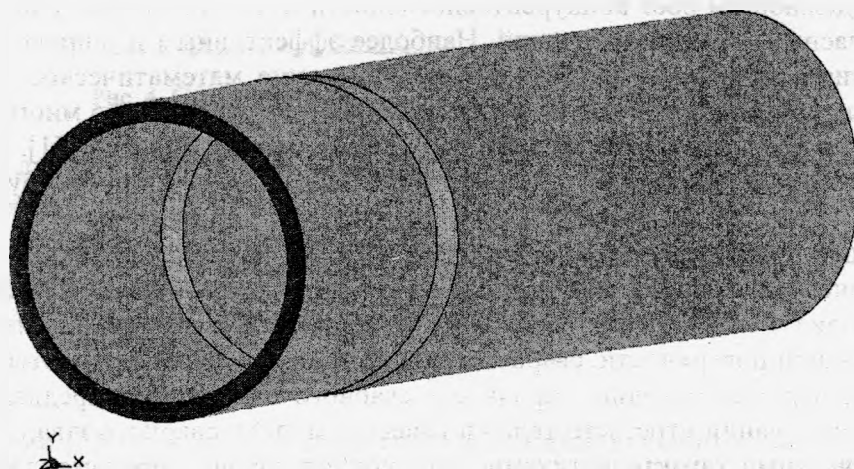


Рис. 1. Твердотельная модель сваренного патрубка, с учетом погрешностей позиционирования

## Построение конечно-элементного разбиения модели патрубка

Выполнено построение конечно-элементного разбиения твердотельной модели патрубка. В ходе предварительного решения установлено, что поставленная задача имеет ряд особенностей, которые необходимо учесть уже на этапе построения конечно-элементного разбиения. К особенностям прежде всего следует отнести наличие «третьего» тела (сварного шва), размеры которого малы по сравнению с размерами патрубков, это приводит к построению некачественного свободного разбиения, а дальнейшее последовательное улучшение разбиения в зоне шва существенно увеличивает количество элементов и снижает скорость решения задачи [1].

Учитывая перечисленные особенности и симметричность модели, было построено упорядоченное разбиение, что приведет к повышению точности решения (рис. 2).

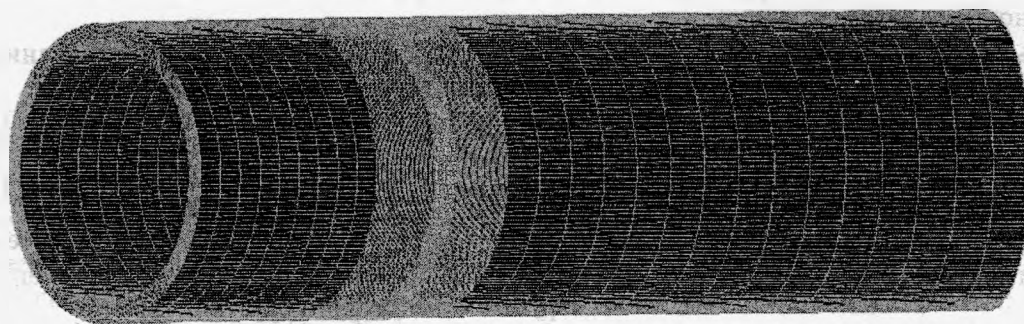


Рис. 2. Конечно-элементное разбиение модели сваренного патрубка

В результате создания конечно-элементного разбиения получилась модель, состоящая из 209000 узлов и 188000 элементов.

### Особенности выбора модели материала

Методические особенности построения модели патрубка, его нагружения и предполагаемого характера деформирования, установленные на предыдущих этапах были учтены при создании конечно-элементной модели для **LS-Dyna** и выборе модели материала [1].

Исходя из анализа деформирования трубы установлено, что:

1. модель материала **LS-Dyna** должна позволять деформироваться трубе пластически;
2. Модель материала должна поддерживать эффект Баушингера.
3. При достижении определенного уровня пластической деформации труба должна разрушаться;

Одним из материалов которые удовлетворяют всем этим требованиям и доступны из препроцессора **LS-Dyna** является модель **Plastic Kinematic** [2].

Модель использует модель упругости и коэффициент Пуассона для описания деформаций в упругой области. Для пластической деформации модель поддерживает в отдельности как модель изотропного или кинематического упрочнения, так и их комбинацию. Это достигается выбором значения некоторого параметра, который принимает значение от 0 (кинематическое упрочнение) до 1 (изотропное упрочнение). Используется модель Cowper-Symonds учитывающая скорости деформаций. Связь деформаций и напряжений может быть установлена только для одной температуры.

Упруго-пластические характеристики материала трубы получены из справочных материалов по технологии титановых сплавов.

### Решение поставленной задачи и анализ полученных результатов

При решении задачи предполагалось, что давление в патрубке возрастает до момента появления сквозного отверстия в поверхности патрубка (рис. 5). Было установлено, что предельное давление, при котором возникает поверхностная трещина, составляет  $5.61 \times 10^7$  Па. Торцевые поверхности патрубка закреплены по всем направлениям (рис. 6). Это позволяет проследить разрушение, обусловленное особенностями механическими характеристиками сварного соединения и исключить влияние геометрии патрубка. Предполагалось, что прочность сварного соединения выше, чем прочность исходного материала патрубка.

При моделировании использовались 12 двухпроцессорных узлов суперкомпьютера «К-1000». Расчеты проводились с использованием явного и неявного алгоритма решения. При явном интегрировании внутренние и внешние силы в каждом узле суммируются, а ускорение в узле рассчитывается делением на массу в узле. Решение получается интегрированием этого ускорения по времени. Явное интегрирование хорошо работает при динамических расчетах, таких как ударные или аварийные воздействия, однако при расчете статических задач или задач с длительным нагружением его использование может стать слишком затратным. Для статических задач больше подходит неявное интегрирование. При неявном интегрировании рассчитывается глобальная матрица жесткости, которая затем инвертируется и используется в системе уравнений, определяющих неуравновешенные усилия в узле, для получения приращения смещения. Преимущество такого подхода состоит в том, что пользователь может сам выбирать размер шага по времени, а его недостатком является большой объем вычислений, которые необходимо сделать для получения, хранения и факторизации матрицы жесткости. Поэтому при неявном расчете используется сравнительно небольшое число шагов, но они требуют значительных затрат времени. Шаг времени расчета выбирался автоматически ( $5.9 \times 10^{-9}$  с) в явном алгоритме и задавался вручную ( $5.0 \times 10^{-4}$  с) при неявном методе решения, т.е. время расчета отличалось на несколько порядков.

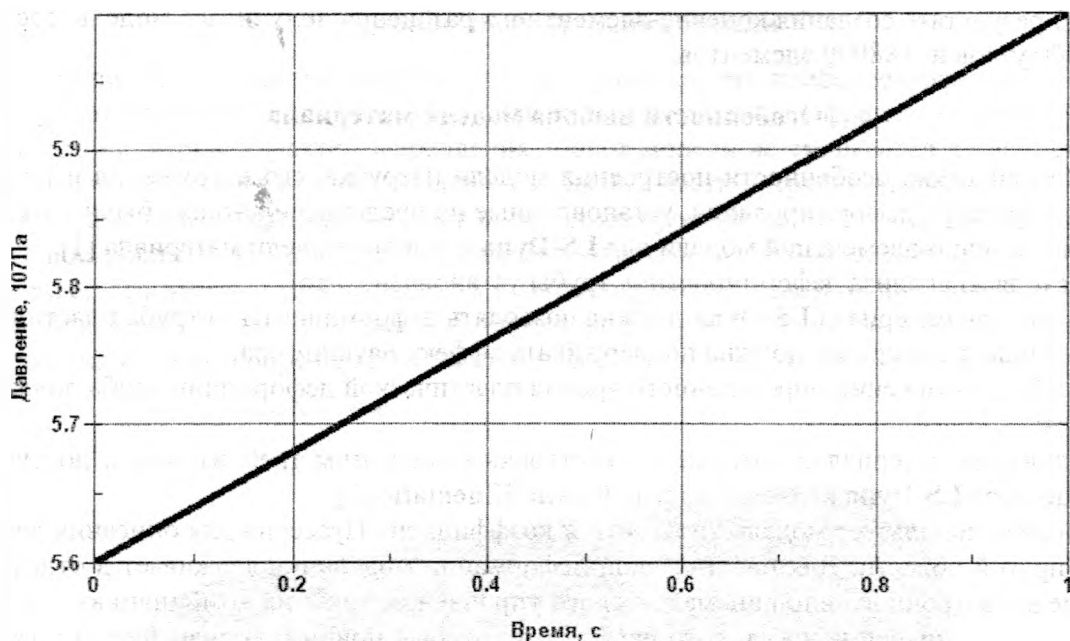


Рис. 5. Зависимость изменения давления во времени

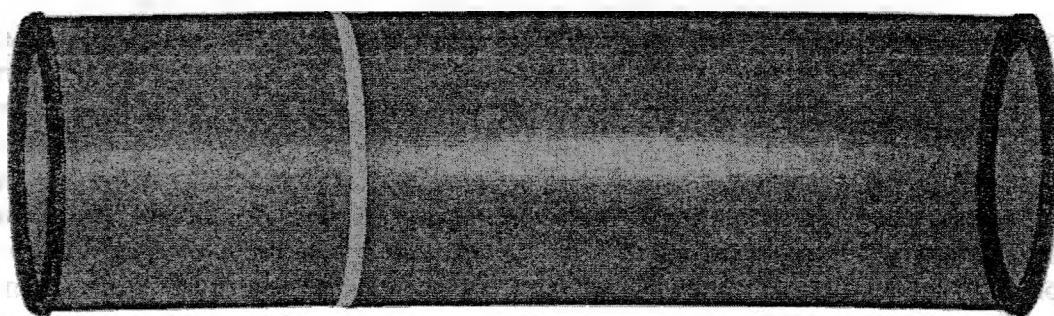


Рис. 6. Закрепление торцевых поверхностей патрубка

В ходе решения задачи при увеличении внутреннего давления в обеих частях сваренного патрубка на границе со сварным швом сформировались две локальные зоны с наибольшими значениями главных деформаций (рис. 7). В дальнейшем в этих местах появились поверхностные трещины (рис. 8) и далее разрывы патрубка. Сварной шов при этом не значительных повреждений не получил.

LS-DYNA KEYWORD DECK BY LS-PRE  
Time = 0.002  
Contour of Max Prin Strain  
min=-1.4058e+07, at elem# 85150  
max=6.27936e+08, at elem# 104000

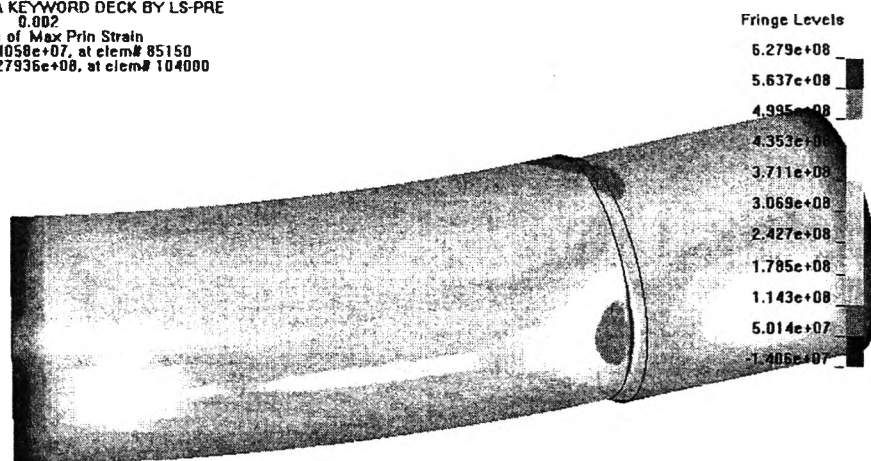


Рис. 7. Концентрация максимальных главных деформаций перед появлением трещины

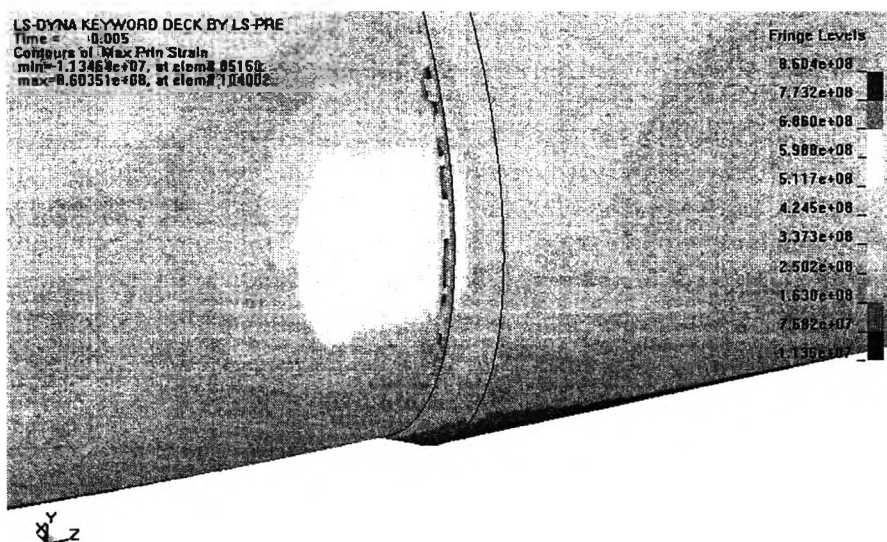


Рис. 8. Появление трещины в патрубке и перераспределение деформаций

### Выводы

Разработана методика исследования сварного шва, которая позволяет определить влияние его механических и геометрических характеристик на разрушение детали.

Результаты решения задачи указывают, что модель материала **Plastic Kinematic** может быть применена к исследованию разрушения сварных деталей.

### Благодарности

Авторы благодарят д.ф.-м.н. С.В.Медведева за плодотворные обсуждения «тонких» моментов работы с пакетом LS-Dyna и помощь в его освоении.

Работа выполнена в рамках проекта ПА 2.7 научно-технической программы Союзного государства «Триада» 2006-2008 гг.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чигарев, А.В., Кравчук, А.С., Смалюк, А.Ф. ANSYS для инженеров. – М: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
2. LS-Dyna Keyword User's Manual. – Livermore Software Technology Corporation, 2003.