

УДК 621.7. 044-681.1(075.8)

## **Применение САПР для моделирования и исследований магнитно-импульсной сварки трубчатых конструкций**

**Астапов В.Ю.\***, **Хорошко Л.Л.\*\***, **Афшари Паям\*\*\***, **Хорошко А.Л.\*\*\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [vikas53@yandex.ru](mailto:vikas53@yandex.ru)*

*\*\* e-mail: [khoroshko@mati.ru](mailto:khoroshko@mati.ru)*

*\*\*\* e-mail: [afshari\\_payam@yahoo.com](mailto:afshari_payam@yahoo.com)*

*\*\*\*\* e-mail: [lesha065@mail.ru](mailto:lesha065@mail.ru)*

### **Аннотация**

Данная статья посвящена разработке методики автоматизированного проектирования как конструкций трубопроводов летательных аппаратов в трехмерном пространстве, в том числе и различных сложных трубопроводных систем, так и моделированию процесса магнитно-импульсного деформирования и образования неразъемных соединения трубопроводов между собой из однородных и разнородных материалов с применением САПР. Для этого применяется компьютерное твердотельное моделирование с решением динамической задачи образования соединений при варьировании различными параметрами конструкции, характеристиками материалов и параметрами магнитно-импульсного деформирования. Решение позволяет подобрать эффективные с точки зрения качества соединений режимы деформирования для

образования требуемых параметров сварки в холодном состоянии в зонах контакта трубчатых конструкций.

**Ключевые слова:** трубопроводы в летательных аппаратах, неразъемные соединения разнородных труб, магнитно-импульсная сварка, система автоматизированного проектирования, твердотельное моделирование трубопроводов, моделирование образования соединений.

### **Введение**

В конструкциях летательных аппаратов, а именно трубопроводных систем, применяются: воздушно-термическая противообледлительная система, система кондиционирования воздуха, топливная система и др., обширно используются жидкости и газы в виде носителей энергии, охладителей, смазочных материалов, в результате чего появляется необходимость в трубопроводных системах. Основным вариантом соединения труб между собой являются плотное соединение труб или сварка. К соединениям трубопроводов предъявляются жесткие требования: обеспечение высокой герметичности при всех условиях эксплуатации, высокую вибропрочность, минимальную массу, технологичность изготовления и обеспечение взаимозаменяемости.

Известно, что причиной значительной доли неисправностей являются производственные дефекты при изготовлении трубопроводов, в первую очередь, их соединений. Образование соединений трубопроводов магнитно-импульсной обработкой происходит путем воздействия сил на внешнюю трубу,

при этом она деформируется и происходит сварка с внутренней трубкой, для лучшего результата внутреннюю трубку можно вращать.

Процесс МИОМ (магнитно-импульсная обработка материалов) является сложным для теоретических расчетов, поэтому важно применение его моделирования с использованием САПР. В настоящее время во многих случаях для моделирования процесса используются достаточно сложные программы, особенно для освоения в производственных условиях. Их применение позволяет достаточно точно проектировать и моделировать сам процесс образования соединений, но требует тщательного освоения программного обеспечения. Нами сделана попытка для моделирования сборки с применением МИОМ использовать более доступное программное обеспечение. Процесс моделирования конструкций трубопроводов в нашем случае начинался с построения внутренней и внешней трубы, индуктора, далее выбирался материал, цвет для наглядности, и в итоге совмещались детали в сборке. При моделировании процесса образования соединений воздействием на одну из трубчатых заготовок давлением импульсного магнитного поля использовалась среда Autodesk Simulation Mechanical.

### **Трубопроводы в конструкциях летательных аппаратов**

В настоящее время трубопроводные системы самолетов и вертолетов включают в себя несколько насосов, десятки агрегатов автоматики, насчитывают тысячи соединений трубчатых конструкций. Существует большое количество самых разнообразных трубопроводов с диаметрами, измеряемыми от долей миллиметра до нескольких метров, и изготовленных из различных

материалов. Применение труб в трубопроводах достаточно широко: гидравлические системы, топливные системы, пневматические системы, в также системы управления, использующие тяги [1].

На современных самолетах гидравлическая система имеет большое значение, наблюдается широкое использование гидроприводов рулевых поверхностей. Долговечность, живучесть и надежность гидросистемы обеспечивает совершенство конструкции агрегатов, многократное резервирование в качестве гидропривода источника энергии, автоматизация управления, контроль работы экипажа. Гидравлические системы используют для управления рулями и стабилизатором, выпуска и уборки шасси просадочно-взлетной механизации, прочих потребителей (рис.1).

Топливная система на самолете предназначена для размещения топлива и бесперебойной подачи его к двигателям в необходимом количестве и с достаточным давлением на всех заданных режимах и высотах полета (рис.2).

В конструкциях летательных аппаратов широко используются газы в качестве охладителей, или в пневмопроводах для обеспечения жизнедеятельности экипажа и пассажиров (рис. 3).

Трубопроводные системы современных самолетов и вертолетов отличаются большим разнообразием и сложностью, что определяется, прежде всего, большим разнообразием выполняемых ими задач. При изготовлении современных конструкций летательных аппаратов широко используются разнообразные материалы, обладающие необходимыми прочностными и физико-химическими свойствами. Возникает проблема соединения материалов,

отличающихся по свойствам. Трубопроводные системы включают в себя, кроме труб, элементы их соединения, агрегаты автоматики, насосы, емкости.

Надежность гидравлической системы машины в значительной мере зависит от надежности и прочности трубопроводов и их соединений, так как разрушение одного участка трубопровода или соединения может вывести из строя всю гидравлическую систему или отдельный ее участок. Указанное обстоятельство заставляет устанавливать весьма высокие требования к надежности не только гидросистемы в целом, но и к ее трубопроводам и соединениям. Соединения трубопроводов должны обеспечивать надежную герметичность их в заданном диапазоне рабочих давлений и температур в ряде случаев при повторных демонтаже и монтаже.

Известно, что причиной значительной доли неисправностей являются производственные дефекты при изготовлении трубопроводов, в первую очередь, их соединений. Трубопроводные системы современных самолетов и вертолетов отличаются большим разнообразием и сложностью, что определяется, прежде всего, большим разнообразием выполняемых ими задач. Помимо своих основных функций по подаче топлива в камеру сгорания двигателей, трубопроводные системы выполняют и дополнительные функции по охлаждению некоторых агрегатов, балансировке самолета, подаче воздуха в кабину пилотов и в салон с пассажирами и некоторые другие.

### **Соединения трубопроводов и их элементов**

К соединениям трубопроводов предъявляют весьма жесткие требования: обеспечение высокой герметичности при всех условиях эксплуатации, высокую

вибропрочность, минимальную массу, способность выдерживать заданное число циклов работы при сохранении высокой герметичности, технологичность [2]. Все их необходимо учитывать при автоматизированном проектировании процесса скоростного образования соединений трубчатых конструкций

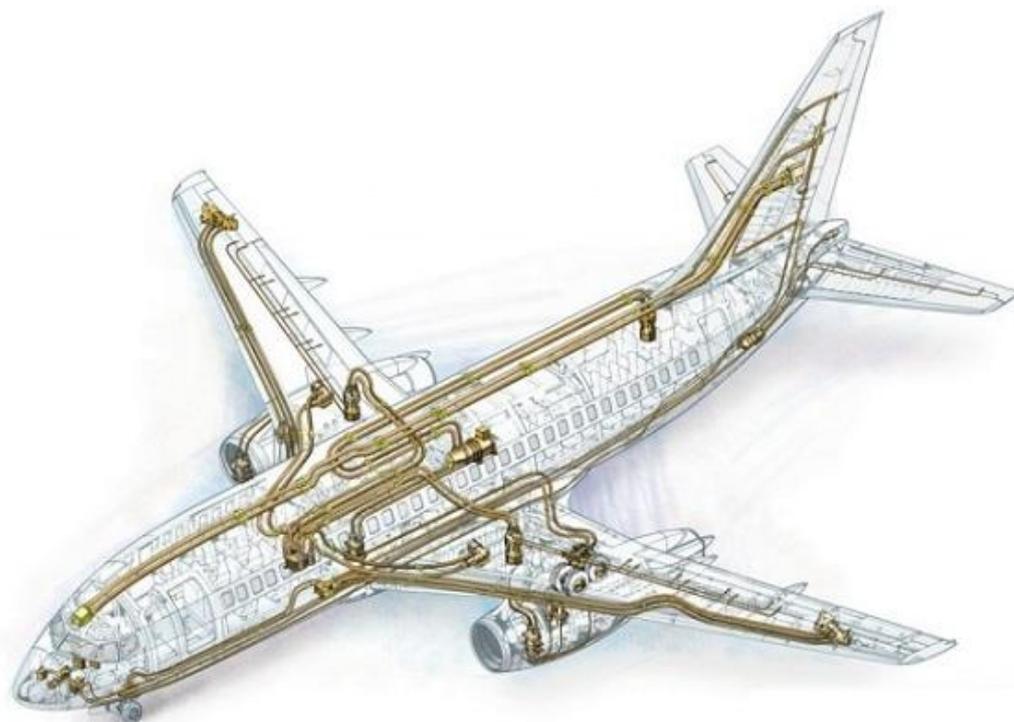


Рис.1. Гидросистема самолета

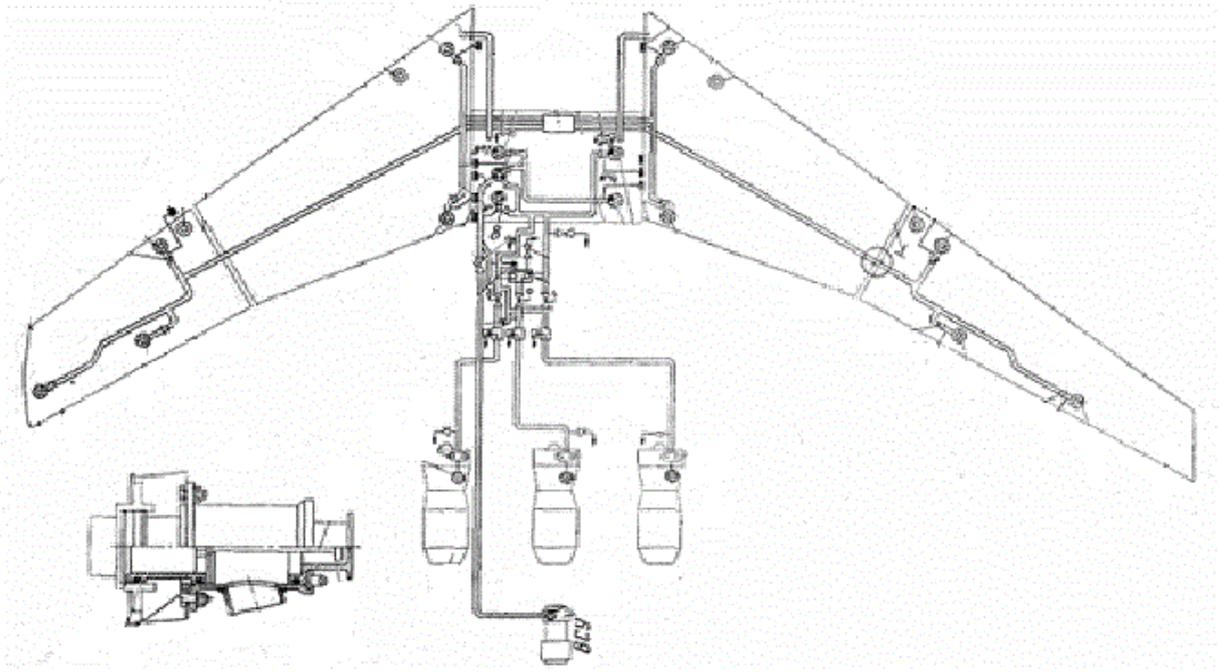


Рис. 2. Топливная система летательного аппарата

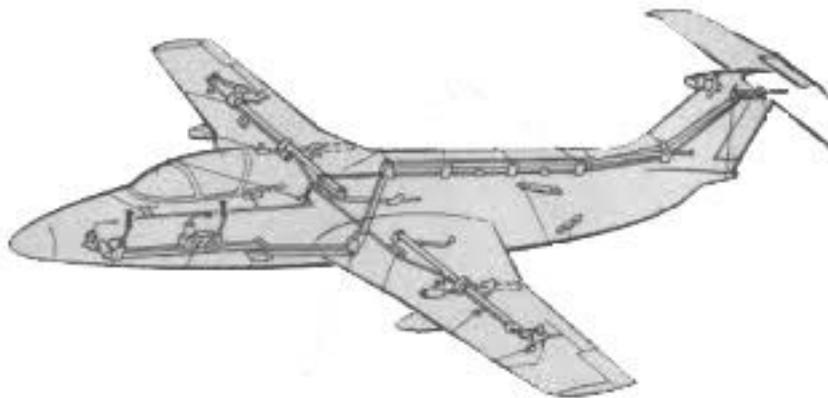


Рис.3 Пневмосистема самолета

Анализ конструкций трубопроводов позволил выявить следующие основные варианты неразъемных соединений трубопроводов, представленные на рис. 4. Это переходники (рис.4,а), трубопроводы с заглушками (рис. 4,б), неразъемные соединения законцовок или изогнутых труб одинакового или разного диаметров (рис. 4 в,г) и применение труб для изготовления тяг сборкой с наконечниками (рис. 4,д).



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 4. Типовые соединения труб

Важнейшим требованием является условие малых гидравлических потерь, минимальных массы и габаритных размеров трубопроводов, что достигается компактной конструкцией, применением легких и прочных материалов. Можно указать также и на требования, вытекающие из условия простоты изготовления и ремонта: технологичность трубопроводных систем и удобство их монтажа и ремонта на летательном аппарате. Наибольшее распространение для соединения разнородных труб между собой и труб с разнообразными наконечниками и ниппелями в авиапромышленности получили следующие виды образования соединений: сборка деформирующим воздействием при температурном воздействии зоны соединения, лазерная сварка, различные холодные виды соединений. К перспективным холодным видам можно отнести также образование соединений трением, сдвигом и давлением. Соединение давлением на одну из деталей получает широкое распространение в промышленности и является одной из наиболее ответственных технологических операций в производственном цикле. Соединение давлением характеризуется рядом важных преимуществ по сравнению со сваркой: химический и фазовый состав не претерпевают никаких изменений. Вследствие этого сборка трубчатых конструкций некоторых разнородных материалов возможно только соединением давлением, особое место среди которой занимают способы сборки при высокоскоростном соударении, в том числе магнитно-импульсная сварка

Магнитно-импульсная сварка (МИС) осуществляется соударением соединяемых поверхностей под действием импульсного поля индуктора и

наведенного им тока в заготовках. Для соударения используются силы электро-механического взаимодействия между вихревыми токами, наведенными в деталях импульсным магнитным полем и самим магнитным импульсным потоком. Импульсное магнитное поле создается за счет разряда батареи конденсаторов на индуктор [3]. Принципиальная схема магнитно-импульсной обработки представлена на рис. 5.

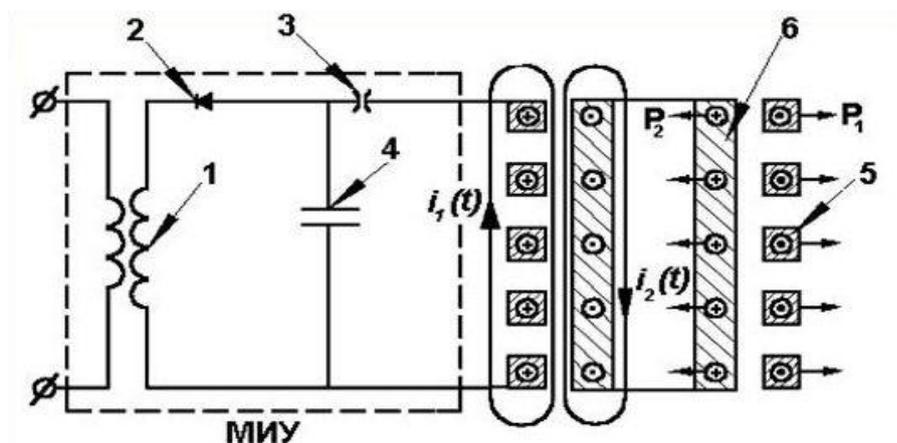


Рис. 5. Принципиальная схема магнитно-импульсной обработки:

- 1 – повышающий трансформатор, 2 – выпрямительное устройство,  
 3 – разрядное устройство, 4 – батарея импульсных конденсаторов, 5 – индуктор,  
 6 – трубчатая заготовка

Соединение при магнитно-импульсной сварке, как и при сварке взрывом, образуется в результате соударения свариваемых поверхностей, приводящего к интенсивным пластическим деформациям и волнообразованию на контактных поверхностях [3]. Однако специфика нагружения метаемого элемента давлением магнитного поля приводит к особенностям в кинематике его движения. Рассмотренный способ сварки выгодно отличается от других

способов сварки высокоскоростного соударения, но вместе с тем не лишен недостатков, ограничивающих области его применения.

Основным условием МИС является высокая электропроводимость соединяемых деталей, так как магнитное поле индуктора интенсивно влияет на деформируемую деталь (трубку). Малопроводящие ток материалы обрабатывают, используя покрытия с высокой электропроводностью.

Однако процесс магнитно-импульсной сварки является весьма сложным процессом, требующим тщательных расчетов и учета различных параметров, таких как усилие деформирования, геометрические параметры соединяемых деталей, электропроводность материалов труб и многие другие, возникает необходимость применения систем автоматизированного проектирования как конструкций соединений, так и самого процесса образования соединений деформированием одной их трубчатых заготовок. При магнитно-импульсной обработке требуется достаточно точный и сложный расчет электромеханических параметров процесса, что приводит к сложным теоретическим выкладкам и решению громоздки уравнений.

Для решения вопросов САПР часто применяются программы для 3D моделирования [5–7]. Процесс МИОМ является сложным для теоретических расчетов, поэтому важно применение его моделирования с использованием САПР. В настоящее время во многих случаях для моделирования процесса используются достаточно сложные программы, особенно для освоения в производственных условиях. Их применение позволяет достаточно точно проектировать и моделировать сам процесс образования соединений, но

требует тщательного освоения программного обеспечения. Применение для моделирования сборки трубчатых конструкций с воздействием МИОМ позволяет использовать и более доступное программное обеспечение. К таким программам можно отнести следующие: Компас-3D, T-Flex CAD, Autodesk Inventor, анализ которых был произведен с точки зрения использования в нашем случае для моделирования магнитно-импульсной сборки трубчатых конструкций. Сравнение представлено в табл.1, а примеры библиотечных окон даны на рис. 6 – 8.

Таблица 1

Сравнительная характеристика программ 3D моделирования

Параметр сравнения	Компас-3D	T-Flex CAD	Autodesk Inventor
Пользовательский интерфейс	Состав многих элементов пользовательского интерфейса существенно зависит от типа активного документа	Собственный интерфейс для управления параметрами модели	Инструменты и команды размещены на Ленте, которая состоит из Вкладок. Операции объединены в функциональные группы на Панелях
3D функционал, приложения для моделирования трубопроводов	Включает в себя функционал, который позволяет спроектировать изделие в 3D. Наличие специализированного приложения «Оборудование: Трубопроводы»	Обладает набором инструментов твердотельного и поверхностного 3D-моделирования. Наличие в меню «Коммуникации» раздела «Трубопровод»	Позволят использовать технологию электронных макетов. Наличие модуля «Трубы и трубопроводы»
Анализ работы сложных конструкций, учитывая большие деформации и напряжения	Позволяет использовать технологию электронных макетов. Наличие модуля «Трубы и трубопроводы»	T-FLEX Анализ организован по модульному принципу, что позволяет пользователю гибко подойти к комплектации рабочего места расчётчика	Связь с другими расширениями, в частности Autodesk Simulation Mechanical. В ней реализованы средства для создания конечно-элементных моделей и сеток

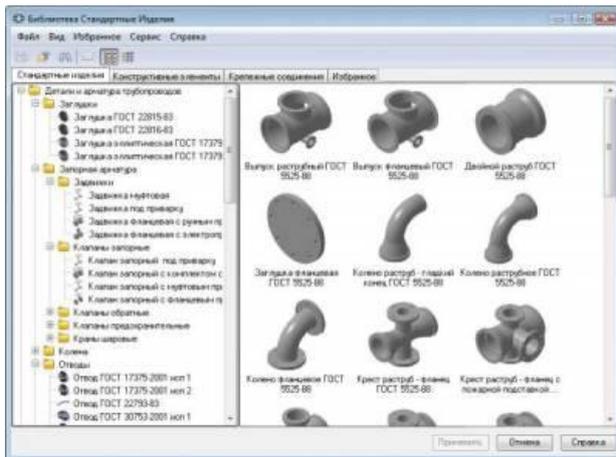


Рис. 6. Детали и арматура трубопроводов для Компас-3D

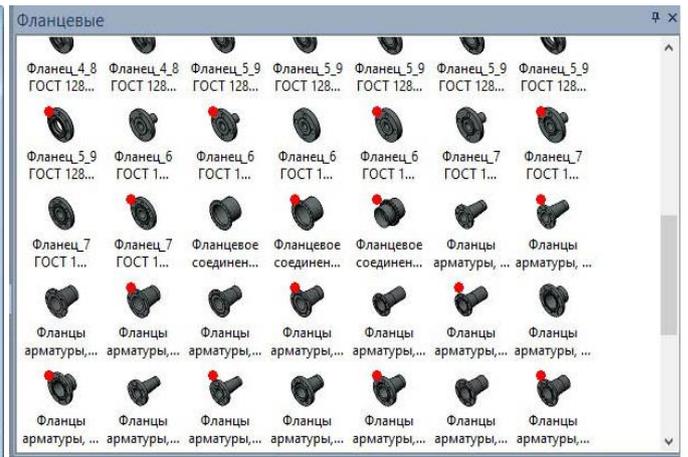


Рис. 7. Примеры библиотечных элементов T-Flex CAD

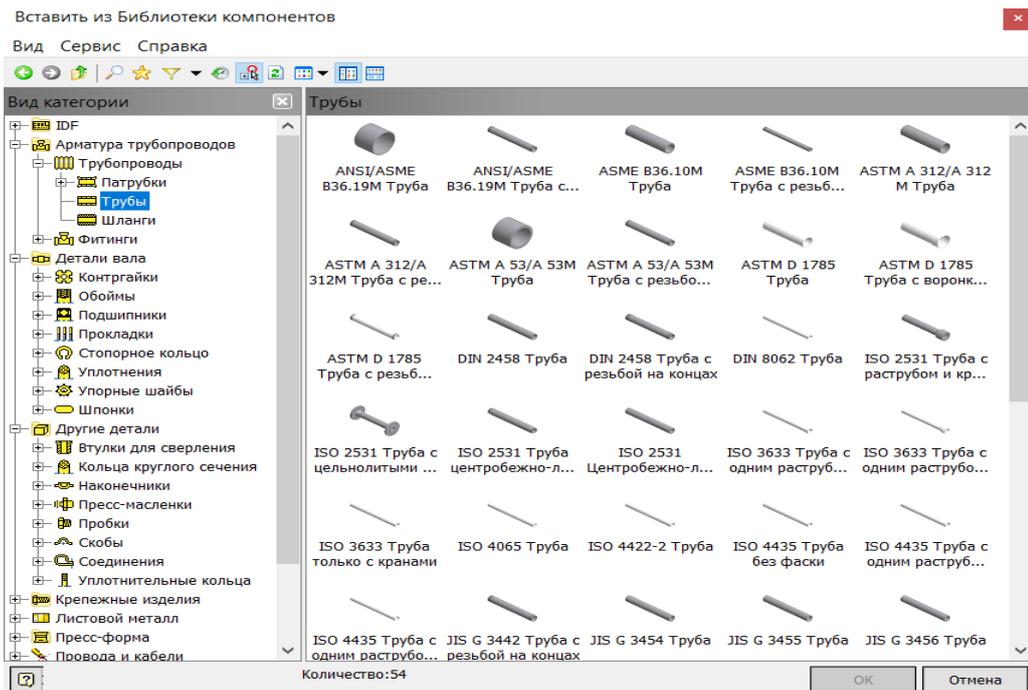


Рис. 8. Окно «Библиотеки компонентов» в новейшей версии Autodesk Inventor

Наглядно продемонстрировать, что происходит при магнитно-импульсной обработке, можно при фронтальном положении камеры или с вырезом (рис. 10).

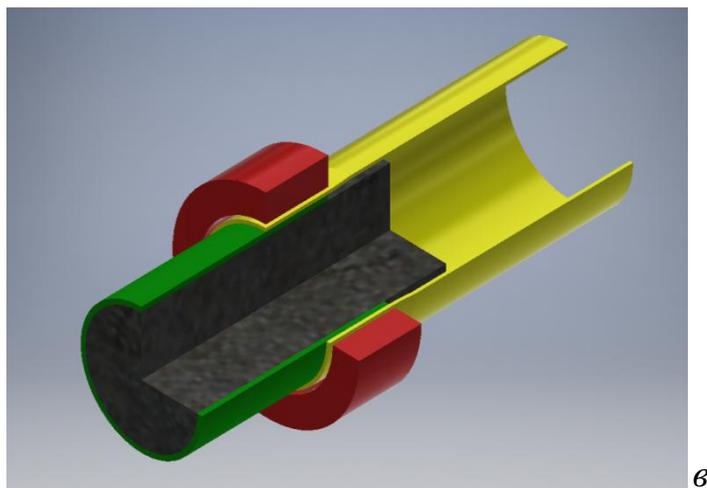
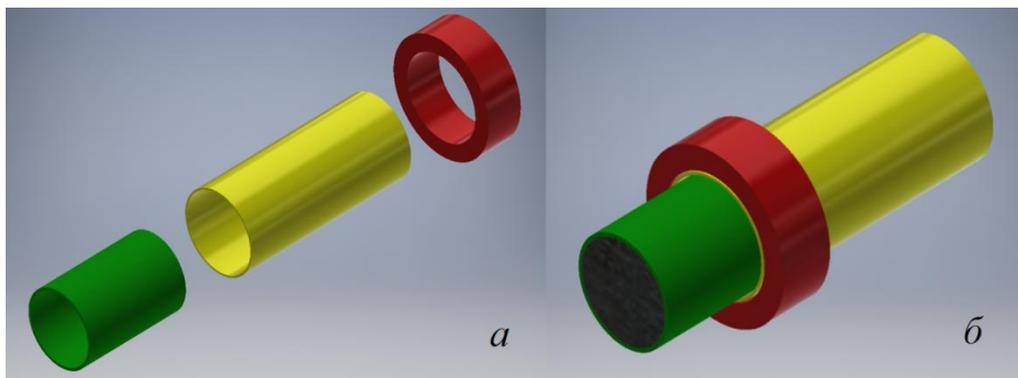


Рис. 9. Элементы конструкции трубопроводов и их сборка: а – компоненты конструкции, б – совмещенные элементы, в – вид с вырезом 1/4

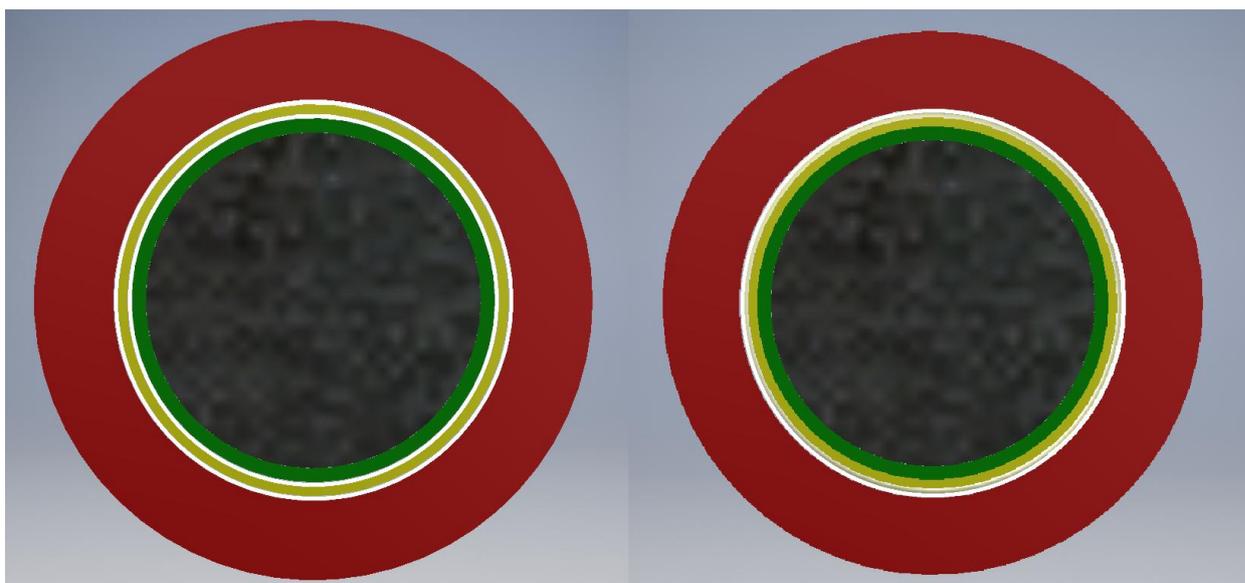
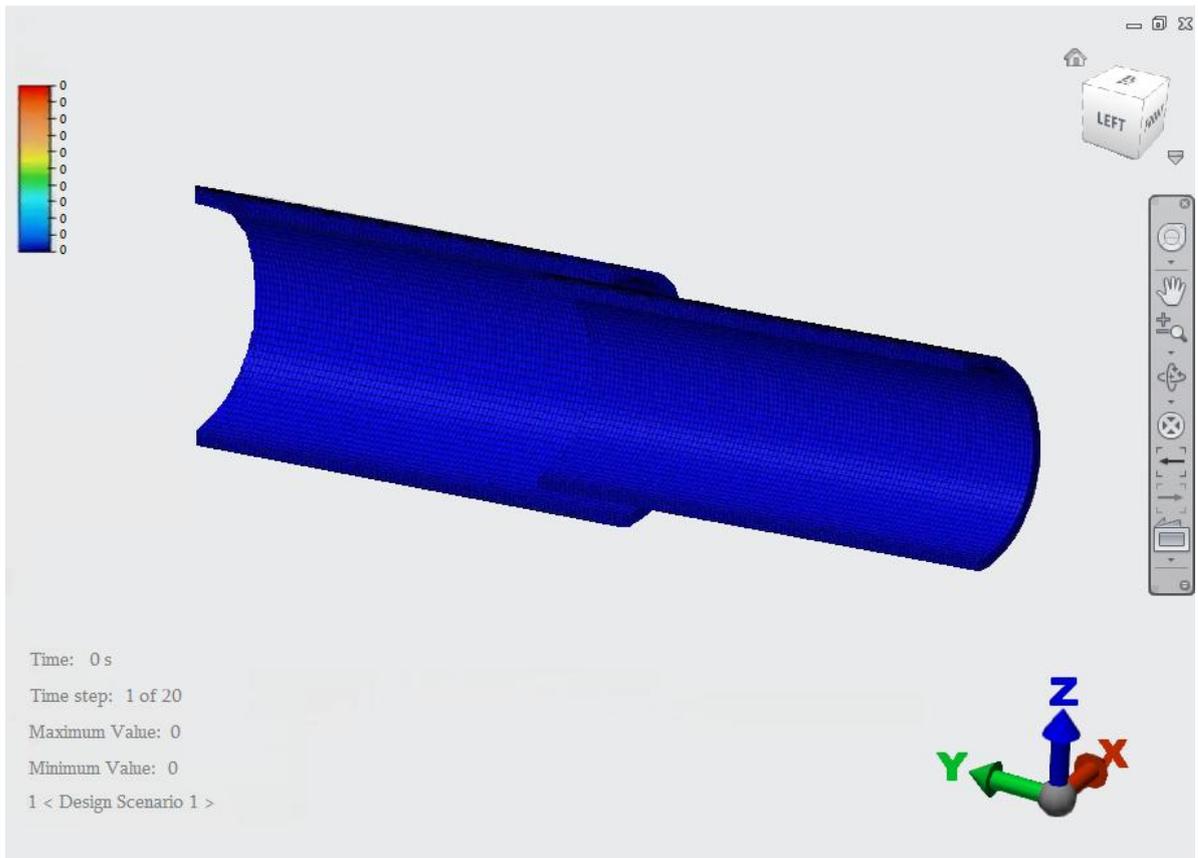
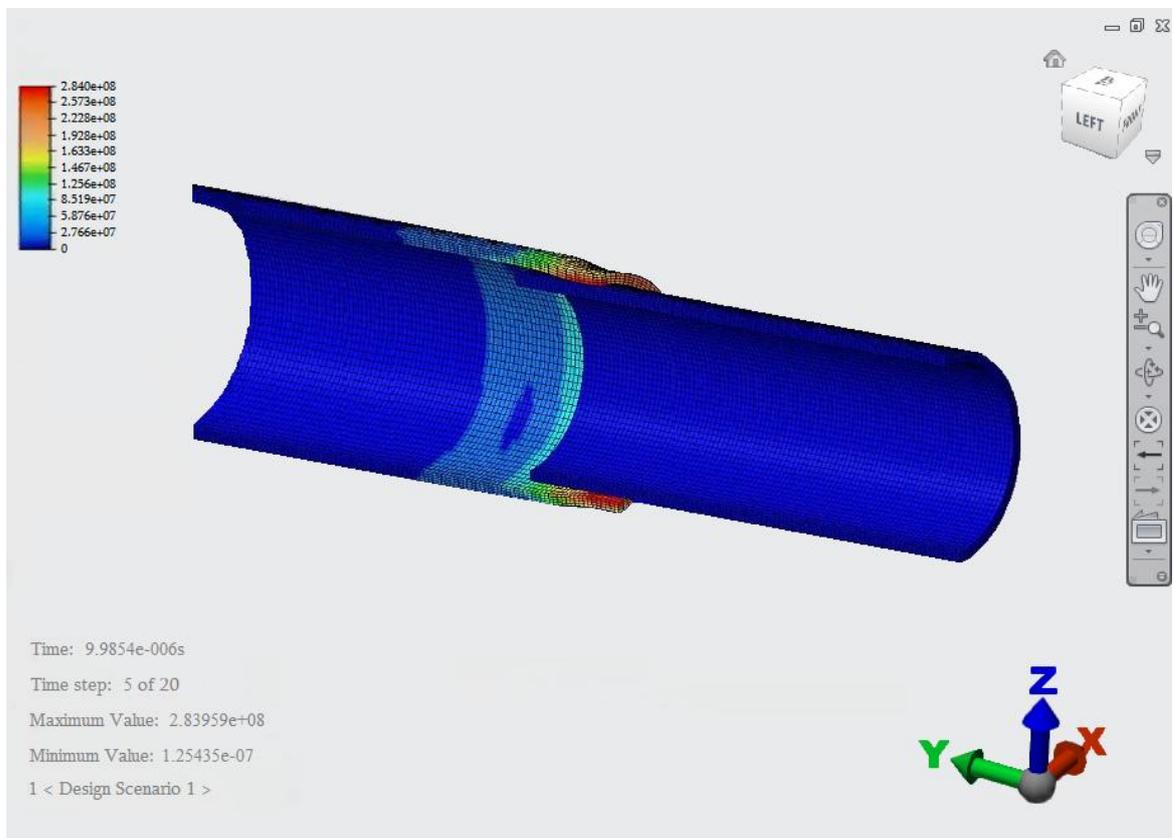


Рис. 10. Вид с фронтальной стороны

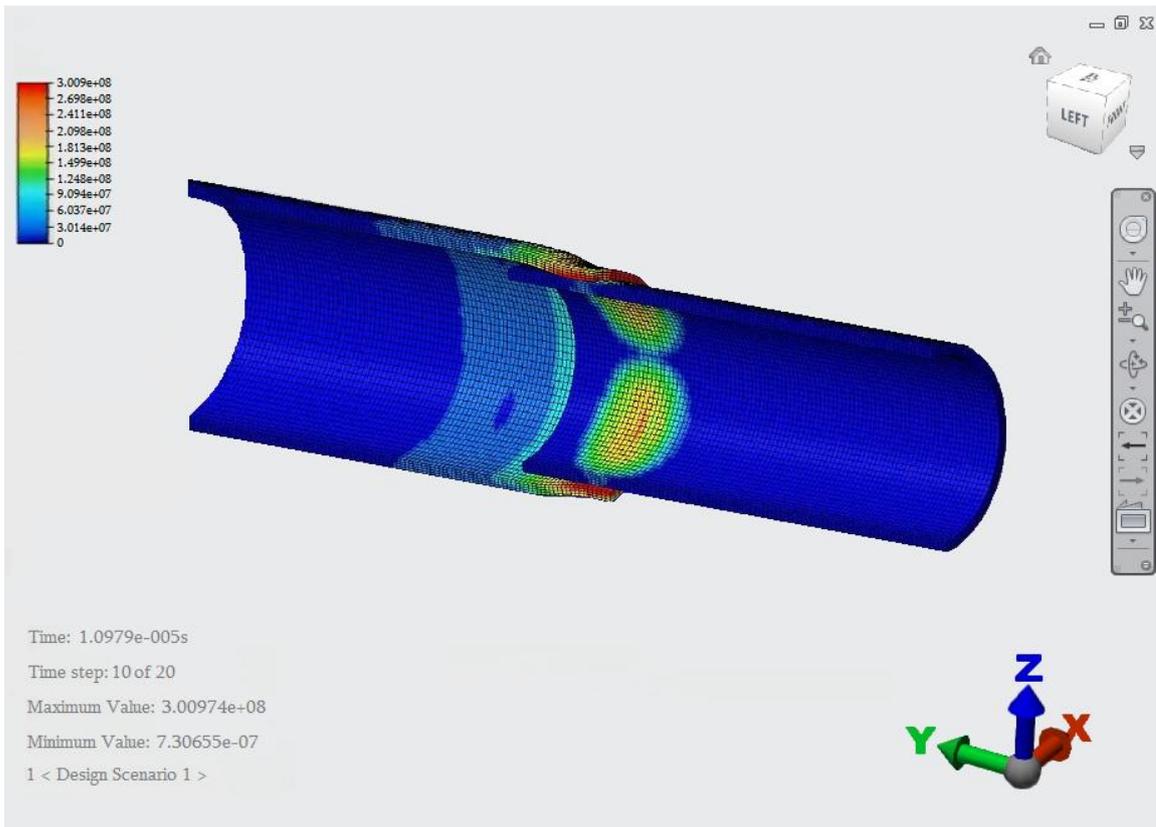
Для моделирования процесса высокоскоростного деформирования импульсным магнитным полем и образования соединений использовалась программа Autodesk Simulation Mechanical 2015. Возникновение контактного напряжения по времени с целью удобного анализа и для наглядности по определению зоны и значений контактных напряжений заготовки показано на рис.11. Для этого всё время процесса деформирования заготовки условно разобьем на 20 шагов, начиная с первого (заготовка без деформации) и через каждые пять шагов фиксируем изменения, тем самым наглядно демонстрируя их. Половинчатый разрез выполнен для наглядности и анализа цветного изображения, что позволяет увидеть возникшие в зоне образования соединений и в прилегающих к ней зонах контактные напряжения, значения которых можно определить, сравнив цвета в разрезе с расположенной слева шкалой соответствия цветовых значений. Также для наглядности была установлена сетчатая поверхность, и все время возникновения напряжения условно разбито на 20 шагов. Моделирование позволяет увидеть наглядно перемещение деформируемой трубчатой заготовки, которое связано не только с изменением ее цвета, но и наглядно увидеть образование самого соединения и определить зону и значения, возникающие между трубчатыми заготовками контактных соединений в соответствии с изменением цвета по времени [8]. Область деформации импульсным магнитным полем принималась 15 мм. Красная зона – максимальное деформирование внешней трубы и место сварки с внутренней. Далее на убывание к синей зоне внешняя труба деформировалась слабее (рис.12).



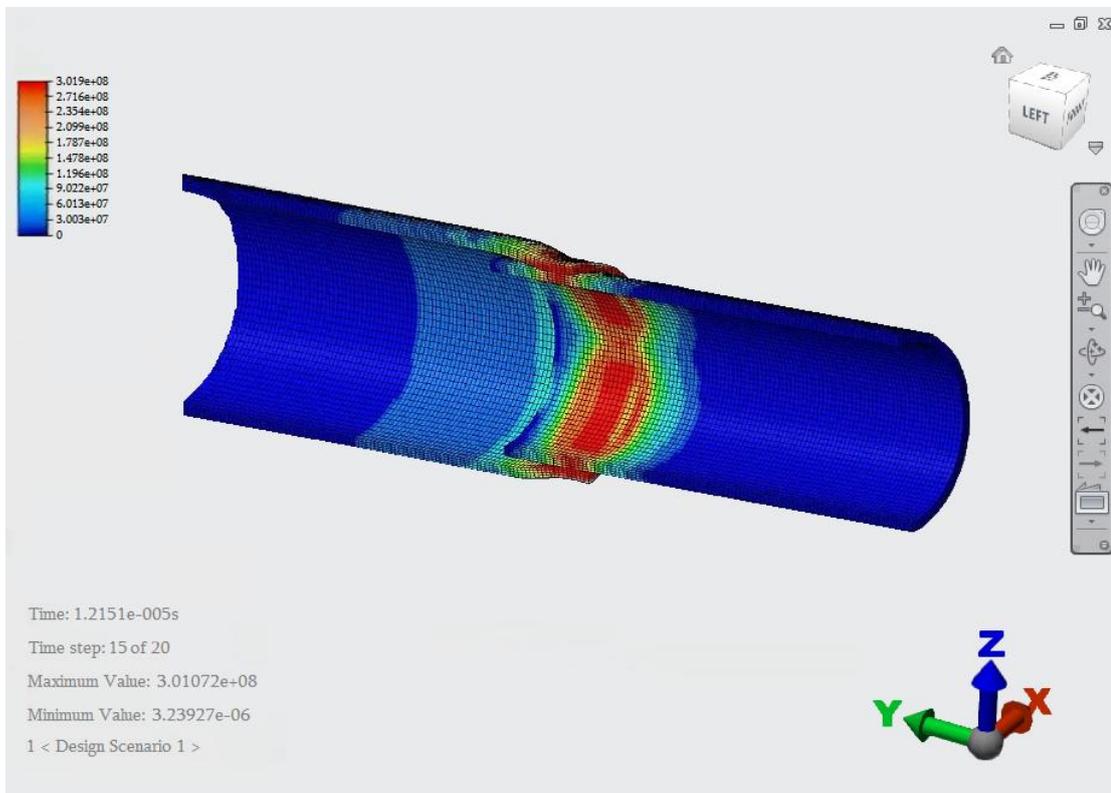
a)



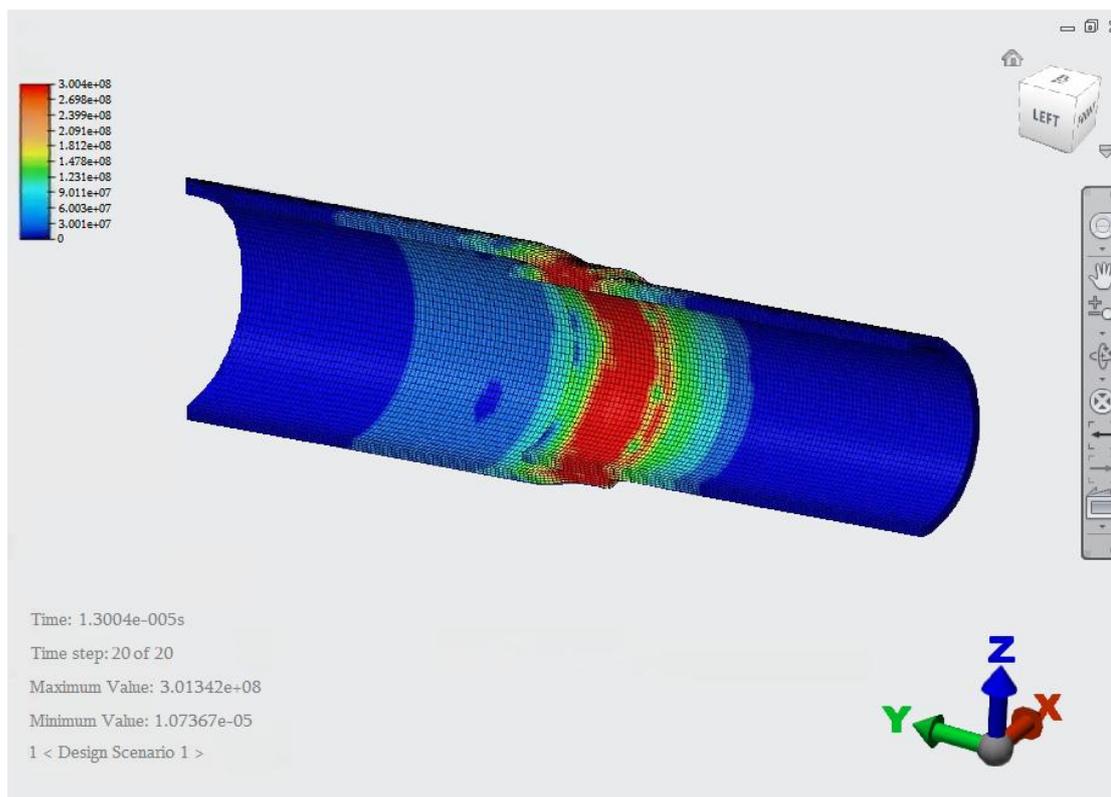
b)



B)



Г)



д)

Рис. 11. Возникновение контактного напряжения по времени: а - шаг 1 из 20;

б - шаг 5 из 20; в - шаг 10 из 20; г - шаг 15 из 20; д - шаг 20 из 20

Диаметры трубопроводов принимались от 10 до 40 мм, толщина стенки – от 0.8 до 1.5 мм, расстояние между деталями около 0.5 мм. В качестве материала были приняты сталь 45, Д16, АМг6 и медный сплав. Значение давления должно быть в промежутке от 3 до 25 кг/мм<sup>2</sup>. Для пояснения на рис. 12 показаны диаметры и длины трубопроводов. В качестве примеров решения задач использовались материалы соединяемых трубчатых деталей – медь и Д16 (рис. 13). Следующие материалы соединяемых трубчатых деталей – Д16 и сталь 45 (рис. 14), и материалы соединяемых трубчатых деталей – сталь 45 и АМг6 (рис. 15).

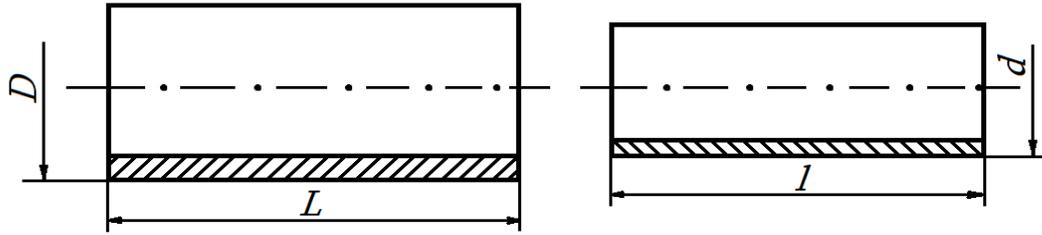
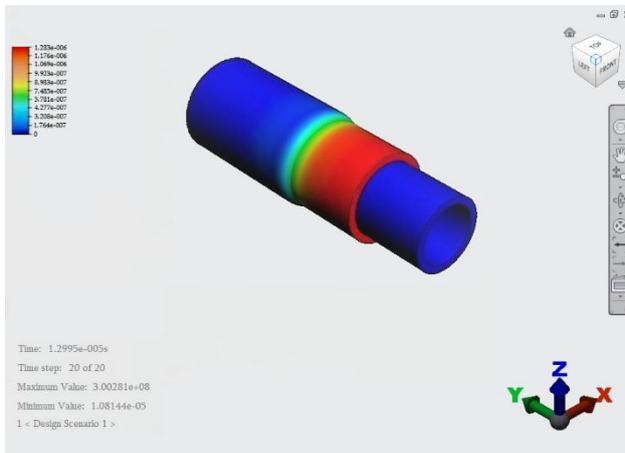
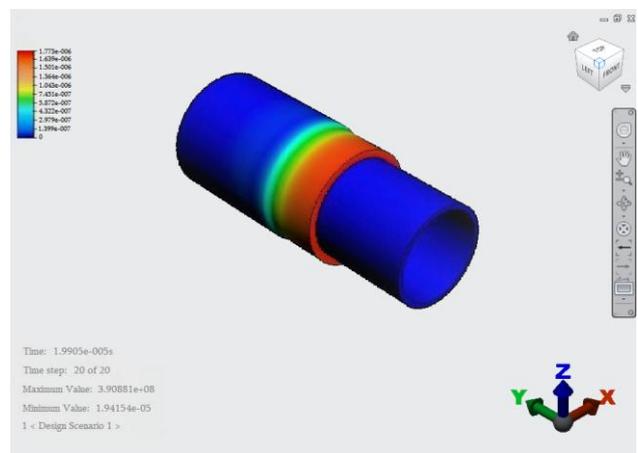


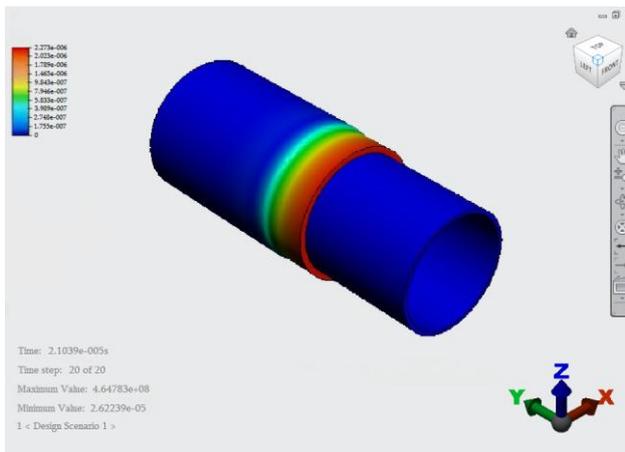
Рис. 12. Диаметры трубопроводов:  $D$  – диаметр внешнего трубопровода,  $L$  – длина внешнего трубопровода,  $d$  – диаметр внутреннего трубопровода,  $l$  – длина внутреннего трубопровода



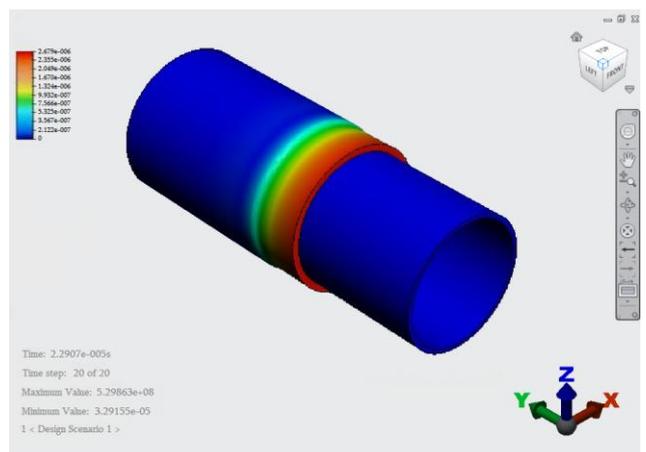
а)  $d=10 \times 1$ ,  $D=13 \times 1$



б)  $d=20 \times 1$ ,  $D=23 \times 1,5$



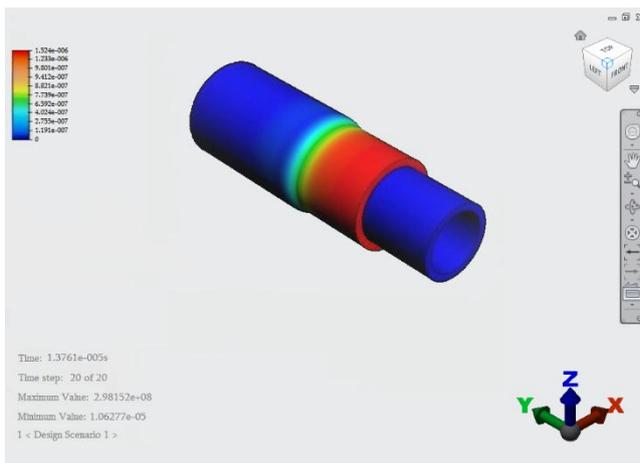
в)  $d=30 \times 1$ ,  $D=34 \times 1,5$



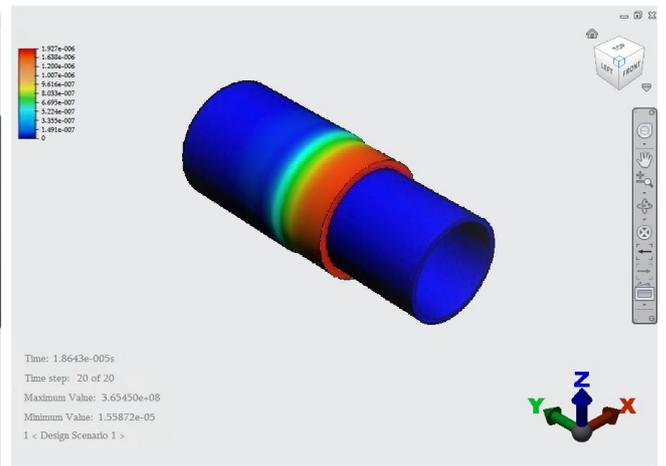
г)  $d=36 \times 1$ ,  $D=40 \times 1,5$

Рис. 13. Моделирование процесса образования соединений материалов

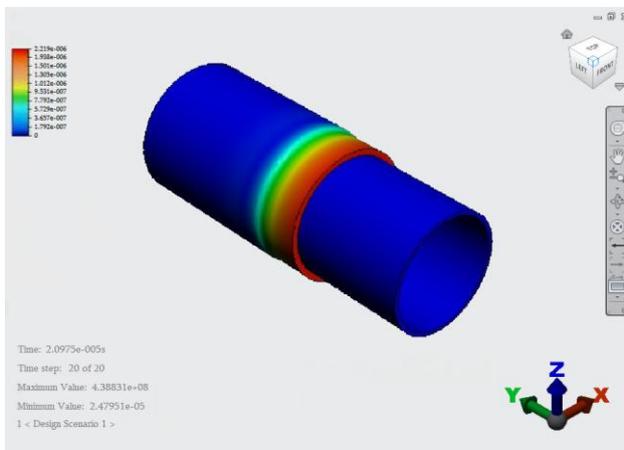
медь и Д16



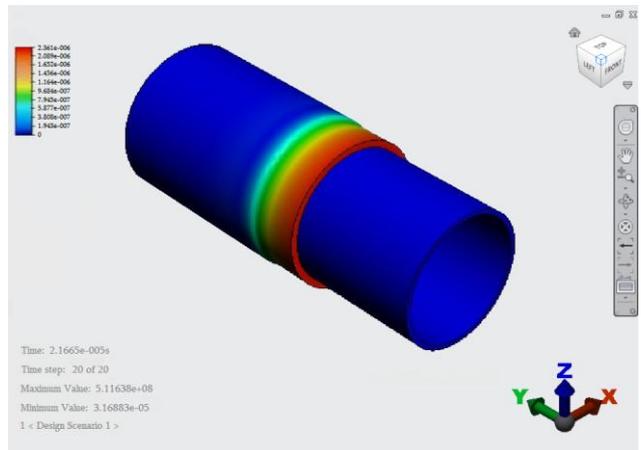
а)  $d=10 \times 1, D=13 \times 1$



б)  $d=20 \times 1, D=23 \times 1,5$

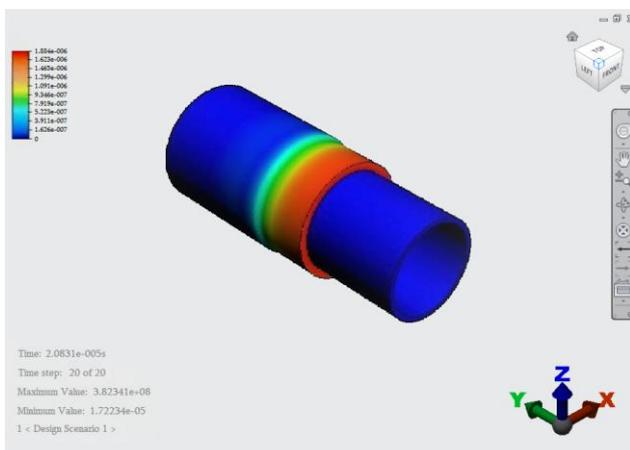


в)  $d=30 \times 1, D=34 \times 1,5$

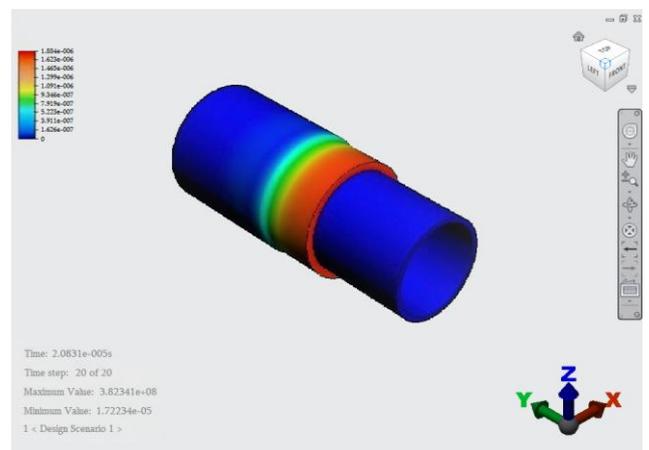


г)  $d=36 \times 1, D=40 \times 1,5$

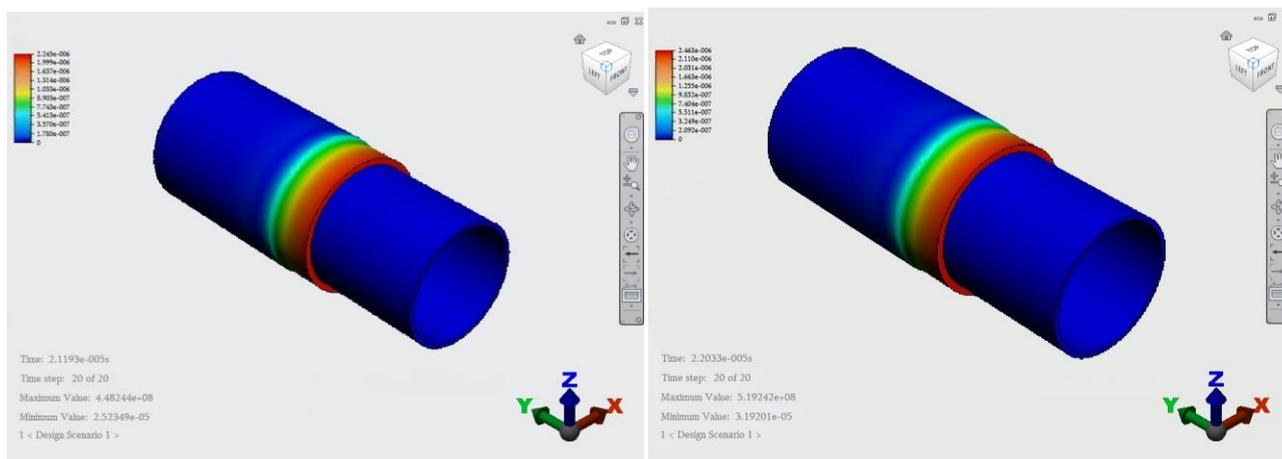
Рис. 14. Моделирование процесса образования соединений материалов Д16 и сталь 45



а)  $d=10 \times 1, D=13 \times 1$



б)  $d=20 \times 1, D=23 \times 1,5$



в)  $d=30 \times 1, D=34 \times 1,5$

г)  $d=36 \times 1, D=40 \times 1,5$

Рис. 15. Моделирование процесса образования соединений материалов

сталь 45 и АМг6

Таким образом, в результате выполненной работы было проведено исследование и изучение теоретических основ о трубопроводных системах ЛА, выполнен сравнительный анализ и осуществлен выбор программного обеспечения для проведения 3D моделирования.

В отличие от известных работ [4-7] было проведено твердотельное моделирование конструкций трубопроводов и моделирование образования неразъемных соединений трубчатых конструкций с использованием более простых и доступных сред проектирования в производственных условиях типа Autodesk Inventor и Autodesk Simulation Mechanical.

Компьютерное моделирование может применяться на всех стадиях разработки и освоения новых технологических процессов, в том числе, изготовления прочных и герметичных соединений трубопроводов из однородных и разнородных материалов в промышленном производстве. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

## Выводы

1. В трубопроводах летательных аппаратов применяются достаточно часто неразъёмные соединения, в том числе сварные, обеспечивающие высокое качество герметичности и прочности самого соединения. Сварка труб давлением образуется в результате сложных физико-химических процессов, происходящих на контактных поверхностях и в при контактных объемах соединяемых материалов. К соединениям трубопроводов предъявляются жесткие требования.
2. Проведенный анализ систем САПР позволил определить, что наиболее подходящим и удобным для применения моделирования труб и индукторов для магнитно-импульсной обработки материалов является Autodesk Inventor, т.к. в системе есть полнофункциональные инструменты модуля «Трубы и трубопроводы» для проектирования трубопроводных систем. Данный модуль предоставляет проектировщикам возможность использовать библиотеку изделий, таких как жесткие трубопроводы с фитингами, гнутые трубы и гибкие шланги.
3. Наглядную демонстрацию возникновения контактного напряжения и моделирование процесса образования соединений магнитно-импульсным воздействием лучше всего выполнить в программе Autodesk Simulation Mechanical, предоставляющей возможность смоделировать процесс высокоскоростного деформирования импульсным магнитным полем и образования соединений. В результате моделирования появляется возможность реально определить эффективные, с точки зрения качества

соединений, режимы деформирования трубчатых конструкций для образования требуемых параметров в холодном состоянии в области контакта, меняя значение давления импульсного магнитного поля для выполнения соединений трубчатых заготовок.

### **Библиографический список**

1. Егер С.М., Матвеев А.М., Шаталов И.А. Основы авиационной техники. – М.: Машиностроение, 2003. – 720 с.
2. Киселев С.Н., Шевелев Г.Н., Рощин В.В., Зеленцов Г.Н., Хаванов В.А.. Соединение труб из разнородных металлов. – М.: Машиностроение, 1981. – 176 с.
3. Дудин А.А. Магнитно-импульсная сварка металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 128 с.
4. Астапов В.Ю., Джоздани М.С. Влияние параметров магнитно-импульсной формовки окантовок люков на их характеристики // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2011. № 12. С. 14 - 18.
5. Болдырев, А.В. Комаров В.А. Автоматизация конструирования летательных аппаратов: Учебное пособие. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П. Королева, 2012. – 123 с.

6. Большаков В.П., Бочков А.Л. Основы 3D-моделирования. Изучаем работу в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor. – СПб: Питер, 2013. - 304 с.
7. Большаков В.П., Бочков А.Л., Лячек Ю.Т. Твёрдотельное моделирование деталей в САД-системах. – СПб: Питер, 2015. – 480 с.
8. Астапов В.Ю., Хорошко Л.Л., Афшари П., Хорошко А.Л. САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 87, URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69638>
9. Меркулов И.Е., Ендогур А.И. Создание модели сварного отсека сверхзвукового самолета с учетом конструктивно-технологической схемы // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81168>