

УДК 621.7. 044-681.1(075.8)

САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов

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*

*** e-mail: khoroshko@mati.ru*

**** e-mail: afshari_payam@yahoo.com*

***** e-mail: lesha065@mail.ru*

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме, необходимой при отработке технологии выполнения соединений трубчатых конструкций авиационной техники деформированием одной из соединяемых трубчатых заготовок давлением импульсного магнитного поля – моделированию этого процесса. Решаются задачи твердотельного создания образцов соединений, исследуются возможности САПР для моделирования отработки режимов технологических процессов и динамического взаимодействия заготовок с решением задач по определению факторов самого соединения при варьировании технологических параметров процесса магнитно-импульсной сборки.

Ключевые слова: трубопроводы, разнородные материалы, соединения трубчатых конструкций, неразъемные соединения, магнитно-импульсное формообразование, высокоскоростное деформирование, системы автоматизированного проектирования, твердотельная модель, трехмерное моделирование.

Введение

В конструкциях летательных аппаратов широко используются жидкости и газы в качестве носителей энергии, преобразующейся в двигательных установках или гидро- и пневмоусилителях, а также в качестве охладителей, смазочных материалов или в пневмопроводах для обеспечения жизнедеятельности экипажа и пассажиров. Наличие жидких и газообразных сред на летательном аппарате приводит к необходимости использовать трубопроводные системы. Топливные и пневматические системы современных ЛА трудно представить без трубопроводов, емкостей для компонентов топлива, агрегатов автоматики, регулирующих их подачу. Автоматизация и механизация управления полетом широкофюзеляжных и среднемагистральных ЛА приводит ко все более широкому внедрению гидро- и пневмосистем. В настоящее время трубопроводные системы самолетов и вертолетов включают в себя несколько насосов, десятки агрегатов автоматики, насчитывают тысячи соединений трубчатых конструкций, при этом длина трубопроводов составляет сотни и более метров [1]. 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 изготовления и обеспечение взаимозаменяемости. Эти требования определяют прежде всего вид соединений трубопроводов и материал, которые выбирают в зависимости от рабочих параметров: давления, температуры, агрессивности рабочей жидкости и внешней среды, диаметра, толщины стенки трубы, необходимой точности стыковки трубопроводов при монтаже, числа циклов при эксплуатации, допустимой негерметичности. Классификация соединений труб из разнородных материалов показывает, что по способам изготовления они могут быть механические, металлургические и комбинированные [1], большую долю при этом занимают неразъемные соединения. В связи с тем, что к трубопроводам летательных аппаратов предъявляют весьма высокие требования по надежности, как правило, применяют различные виды соединений, обеспечивающих более высокое качество соединений трубчатых конструкций. При изготовлении трубопроводов имеет место

сборка деталей типа ниппелей, наконечников, фланцев, переходников и тройников с цельнотянутыми бесшовными трубами или сварными трубами, имеющими продольные швы. При окончательном монтаже в последнее время часто встречаются соединения точеных (или высаженных) цилиндрических деталей небольшой протяженности типа ниппелей, наконечников с трубчатыми заготовками. 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, сварка световым лучом, различные холодные виды соединений. К перспективным холодным видам можно отнести также образование соединений трением [2], сдвигом и давлением [3]. 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 сборка [4].

Магнитно-импульсная сборка трубопроводов и их элементов

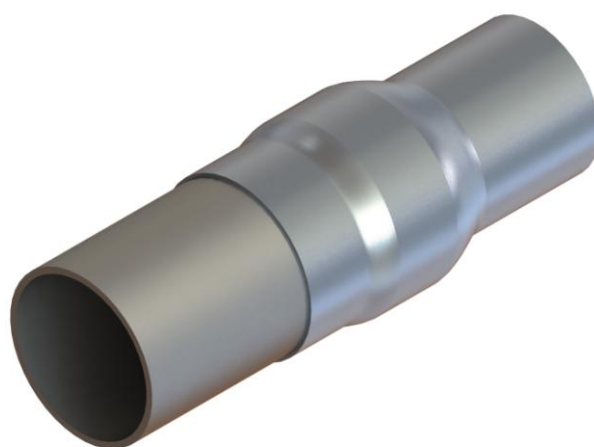
Магнитно-импульсная сборка трубопроводов из разнородных материалов позволяет с высокой точностью дозировать деформирующее усилие, характеризуется стабильностью режимов деформирования, возможностью

концентрации усилий в требуемых зонах и обеспечением высокопрочных и герметичных соединений [4]. Она применяется для сборки труб с отдельными законцовками и трубопроводов (типа труба-труба) как из однородных материалов, герметичное соединение которых другими способами затруднено или невозможно, так и для сборки трубопроводов из разнородных материалов и обеспечивает качественные соединения применяемых в авиастроении труб-переходников (рис. 1 а, б), трубчатых заготовок с заглушками-ниппелями (рис. 1, в), труб со штуцерами (рис. 1,г).

Сущность магнитно-импульсной сборки труб, схема которой представлена рис.1, заключается в следующем: через повышающий трансформатор 1 и выпрямительное устройство 2 заряжается конденсаторная батарея 3. По достижении заданного уровня зарядки через блок автоматики отключается заряжающий участок и при срабатывании разрядного устройства 4, накопленная в конденсаторной батарее энергия выделяется в индукторе 5. В результате наводимых вихревых токов в заготовке 6 она обжимается и соединяется с внутренней трубчатой заготовкой 7.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Общий вид трубопроводов из разнородных материалов

При правильно подобранных режимах деформирования, скорости полета деформируемой трубы и соударения с внутренней трубой происходит холодное соединение, в том числе и разнородных материалов.

Целью настоящей работы является моделирование процесса магнитно-импульсного деформирования и соединения трубопроводов между собой и с ниппелями из однородных и разнородных материалов с применением САПР, компьютерное твердотельное моделирование с решением динамической задачи образования соединений при варьировании различными параметрами конструкции, характеристиками материалов и изменением режимов давления импульсного магнитного поля до определения требуемого по заданной деформации величины.

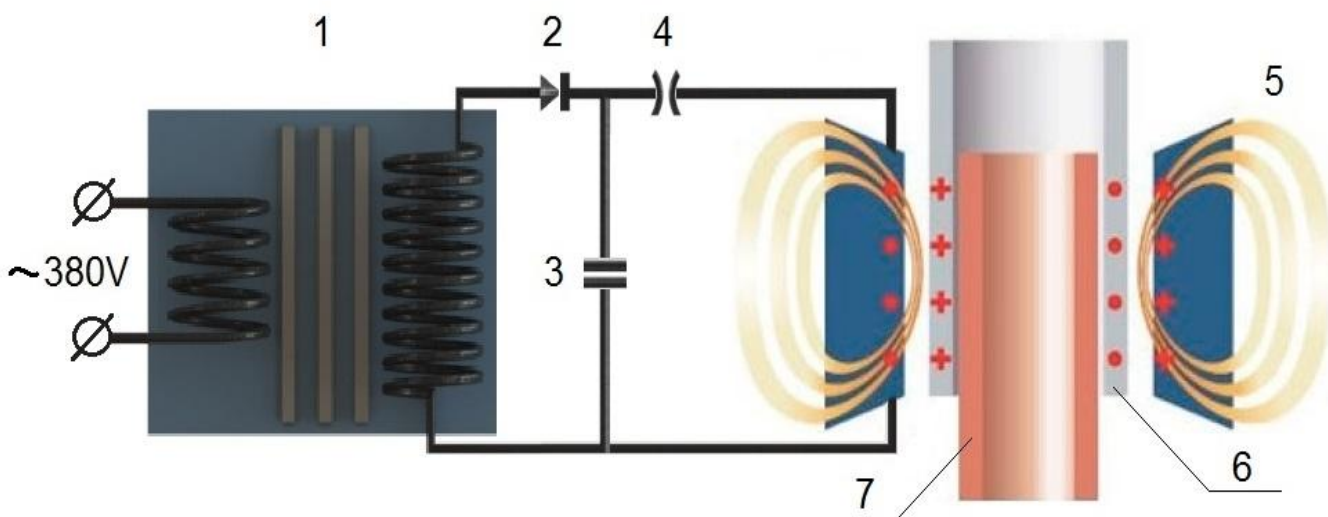


Рис. 2. Схема магнитно-импульсной сварки: 1 – повышающий трансформатор, 2 – выпрямительное устройство, 3 – импульсные конденсаторы, 4 – разрядное устройство, 5 – индуктор, 6 – деформируемая трубчатая заготовка, 7 – соединяемая с деформируемой заготовкой внутренняя труба

Моделирование режимов магнитно-импульсного соединения

Процесс магнитно-импульсного деформирования и образования сборных конструкций является динамическим и достаточно сложным для решения расчетным путем, требует, как и любой технологический процесс при внедрении в производство, тщательной отработки технологических режимов. Магнитно-импульсная обработка материалов - это сложный электромеханический процесс, результаты которого определяются параметрами установки, индуктора, электрическими и механическими свойствами заготовок [4].

При создании компьютерной модели одним из важных направлений является геометрическое, параметрическое твердотельное и поверхностное моделирование

сложных изделий. В рамках этого направления применяются передовые 2D и 3D технологии для визуализации, моделирования и анализа поведения разрабатываемых конструкций на ранних стадиях проектирования. Это дает специалистам возможность тщательно подготовить и оптимизировать компьютерную модель, прежде чем она будет реализована физически. Благодаря возможности не только увидеть виртуальную модель, но и возможности моделирования процесса экономятся время и средства, повышается качество окончательной отработки режимов технологических процессов без дополнительной экспериментальной отработки.

В настоящее время в области создания наукоемкой продукции конечный продукт является в большинстве случаев сложным многокомпонентным изделием. При этом срок проектирования, отработки технологии превышает срок ее изготовления в два-три раза. Многокомпонентность подразумевает совместную работу большого количества предприятий, и продуктивность этой работы определяется возможностью быстро и качественно обмениваться технической информацией. Очевидно, что от возможностей программного продукта, применяемого предприятиями для проектирования и подготовки производства, во многом зависит оптимальный учет этих факторов и эффективное решение других специфических задач промышленного производства [5].

В связи с этим информационные технологии играют существенную роль в отработке технологических процессов, применяемых в авиационной промышленности. Комплексное внедрение технологий виртуальной разработки и

сопровождения становится необходимым условием для выполнения целого ряда важных задач, таких как ведение сложных научно-технических расчетов, обновление производства, снижение рисков, повышение надежности изделий, обеспечение правильно выбранных технологических режимов изготовления элементов конструкций летательных аппаратов. Использование средств компьютерного моделирования позволяет избавиться от необходимости проведения сложной отработки технологических процессов и эксплуатации оборудования, которые, как известно, очень дороги и продолжительны.

В некоторых работах [6 – 10] приводятся результаты моделирования оснастки и технологических процессов для решения задач магнитно-импульсного деформирования и формообразования трубчатых конструкций.

Применение САПР, как средств твердотельного компьютерного моделирования и моделирование отработки режимов технологических процессов позволяет:

- Проводить сборку и оптимизацию виртуальных моделей узлов с использованием параметризации, что позволяет корректировать конструкцию соединений на стадии отработки и последующего изготовления.
- Проводить динамическое моделирование (для деформирования одной из трубчатых заготовок давлением импульсного магнитного поля) технологических процессов изготовления элементов конструкций ЛА.
- Выполнять виртуальные испытания конструкций и изделий самолета, его узлов и агрегатов с использованием виртуальных моделей.

- Проводить визуализацию изделий ЛА в фотореалистичные изображения и выполнять анимацию объектов проектирования. Это предоставляет возможность готовить наглядные и качественные представления изготовления соединений трубчатых конструкций будущего изделия на всех этапах работы над проектом.
- Формировать рабочую документацию изделия по цифровому прототипу, что позволяет существенно сократить количество ошибок и ускорить разработку продукции.

При создании деталей элементов конструкций ЛА и последующего моделирования процесса магнитно-импульсного деформирования применялась среда проектирования Autodesk Inventor. Среда проектирования Autodesk Inventor была использована для изучения динамического процесса сборки оболочечных конструкций методом штамповки. Использование данного программного комплекса позволило не только создать широкий класс осесимметричных заготовок, соединений и конструкций, но и смоделировать процесс деформирования в режиме реального времени. Для моделирования трехмерных объектов сложной геометрической формы, к которым можно отнести осесимметричные трубчатые заготовки с прямолинейной или криволинейной образующей, конструкций соединений, инструмента и оснастки использовались различные инструменты создания геометрии: «Выдавливание», «Вращение», «По сечениям» и т.д. Используя эти и другие инструменты, а также широкий набор средств, позволяющих обеспечить необходимую точность моделирования, были созданы сложные геометрические модели, состоящие из множества элементов.

Одновременно при моделировании процессов деформирования и формообразования возможно использование следующих пакетов программ: ANSYS, LS-DYNA, ALTAIR HYPER MESH, ABAQUS и других. Также в нашем случае важным являлась возможность решения связанных нелинейных динамических задач с учётом явлений электромагнетизма, тепловых эффектов и процессов деформации. По нашему мнению на данный момент наиболее подходящим для решения подобных задач является многоцелевой конечно-элементный комплекс LS-DYNA.

Твердотельное моделирование проводилось на мелкой трехмерной сетке с большим количеством элементов и малым шагом по времени. При создании компьютерной модели одновременно использовался пакет HyperMesh для генерации мелкой объемной сетки и геометрических параметров твердотельных трехмерных 3D моделей (рис.3). Для создания этих деталей принимаем следующие упрощенные геометрические данные:

- внутренняя труба (рис.3, а): $D = 17$ мм , $d = 15$ мм , $L = 50$ мм, цвет зеленый
- индуктор (рис.3, б): $D = 24$ мм , $d = 20.5$ мм , $L = 15$ мм, цвет красный
- наружная труба (рис.3, в): $D = 20$ мм , $d = 18$ мм , $L = 40$ мм, цвет желтый

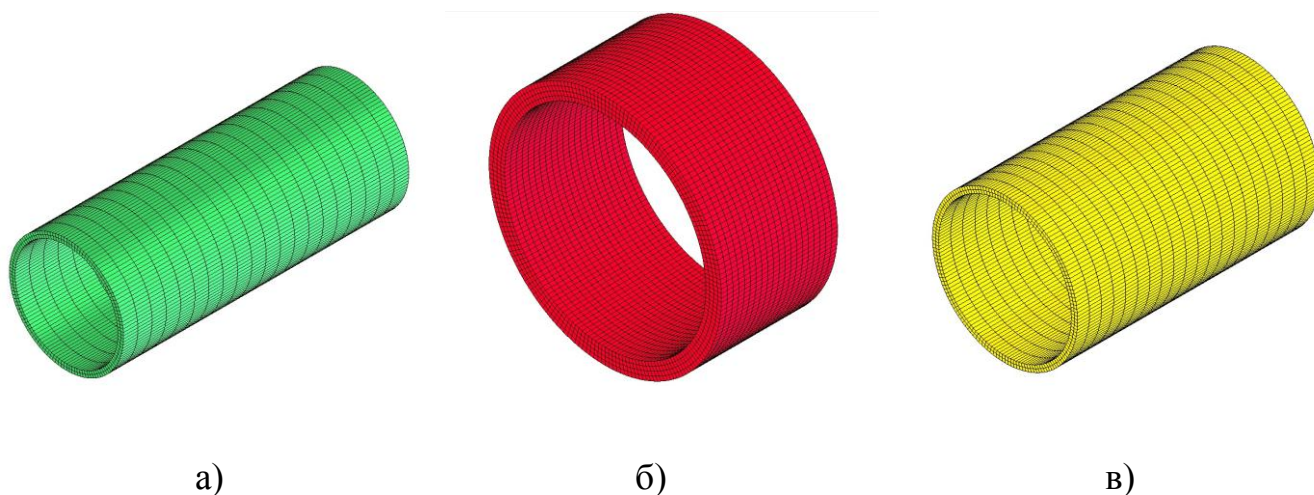


Рис. 3. Моделирование трубопроводов и индуктора: а – внутренняя труба,
б - индуктор, в – труба наружная

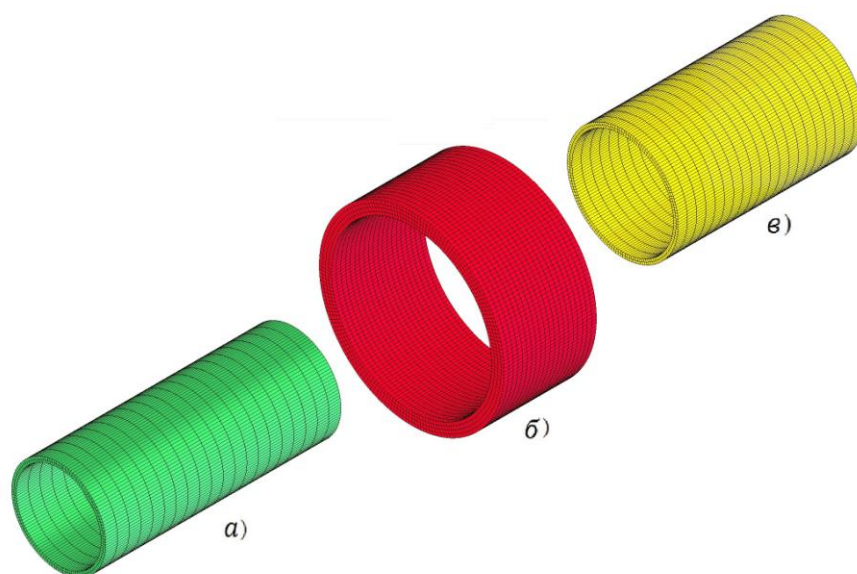


Рис. 4. Расположение твердотельных 3D моделей по одной оси

Для удобства решения программы в режиме анимации следующими этапами стали: расположение твердотельных моделей по одной оси (рис. 4), объединение моделей с расположением, как при сборке трубопровода (рис.5, а) и половинчатым разрезом объединенных моделей труб и индуктора для получения большей наглядности образования соединения (рис. 5, б) и моделирования перемещения деформируемой заготовки по времени.

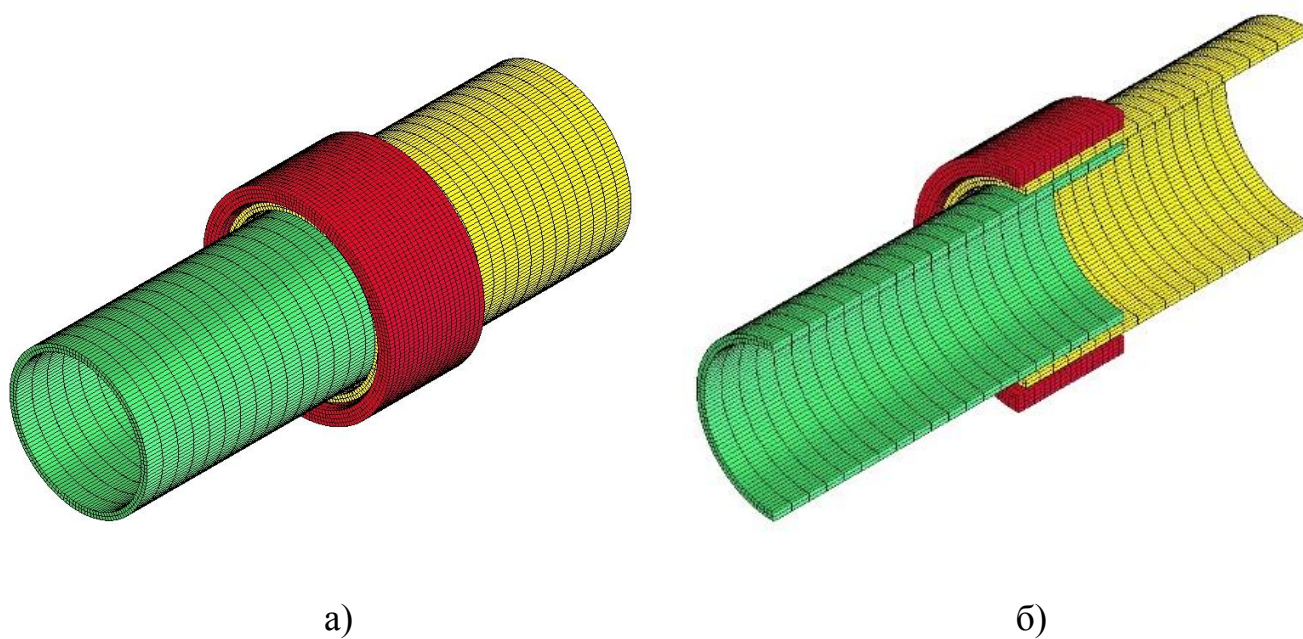


Рис. 5. Твердотельные 3D модели

Далее решается тестовая задача в программе LS-DYNA при изменении давления импульсного магнитного поля в диапазоне от нулевого значения до значения, обеспечивающего плотное и прочное соединение (в нашем случае значение энергии зарядки конденсаторной батареи составляло до 6 КВт). С целью определения кинематических и динамических характеристик процесса образования соединения был смоделирован процесс соединения двух трубчатых заготовок посредством операции «обжим» внешней трубы на внутреннюю под воздействием деформирующего давления импульсного магнитного поля. Последовательность образования соединения в фиксированные интервалы времени представлена на рис. 6. Из него видно, что с течением времени начинается перемещение стенки деформируемой заготовки (труба желтого цвета) до полного соприкосновения со второй, внутренней заготовкой (труба зеленого цвета). Для наглядности на рис. 6 представлена картина образования соединения в выполненной на моделях сеткой, которая искажается в процессе перемещения стенки труб. На рис. 7 показана

конечная деформация трубчатых заготовок для различных геометрических параметров соединяемых трубопроводов и различных материалов. По цвету деформируемой детали в соответствии со шкалой цветов, представленной справа, можно определить в итоге эту конечную деформацию трубы, на которую воздействует деформирующее усилие импульсного магнитного поля. На рис. 8 представлен вариант моделирования образования соединений со следующими принятыми размерами трубопроводов: размеры внутренней трубы – $d=20 \times 1,5$; размеры наружной трубы – $D=24 \times 1,5$; при этом соединяемые трубопроводы выполнены из наиболее применяемых в авиастроении сочетаний разнородных материалов.

На рис. 7 и рис. 8 красная зона представляет собой зону герметичных неразъемных соединений типа сварки. Эта зона уменьшается с возрастанием прочностных свойств материала и уменьшается также с возрастанием геометрических размеров труб, учитывая, что ширина зоны воздействия моделируемого давления импульсного магнитного поля оставалась во всех моделируемых экспериментах неизменной.

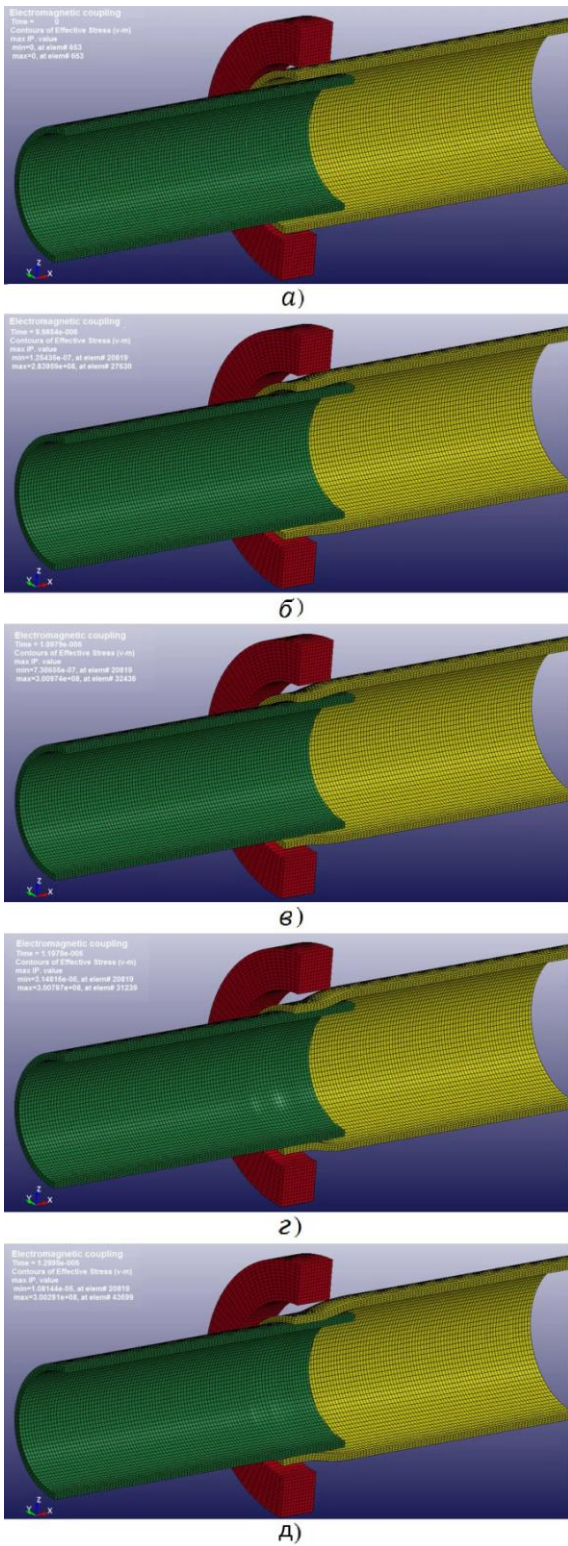


Рис.6. Процесс соединения

а) $t=0 \mu\text{s}$; б) $t=9,9 \mu\text{s}$; в) $t=10,09 \mu\text{s}$;

г) $t=11,9 \mu\text{s}$; д) $t=12,9 \mu\text{s}$

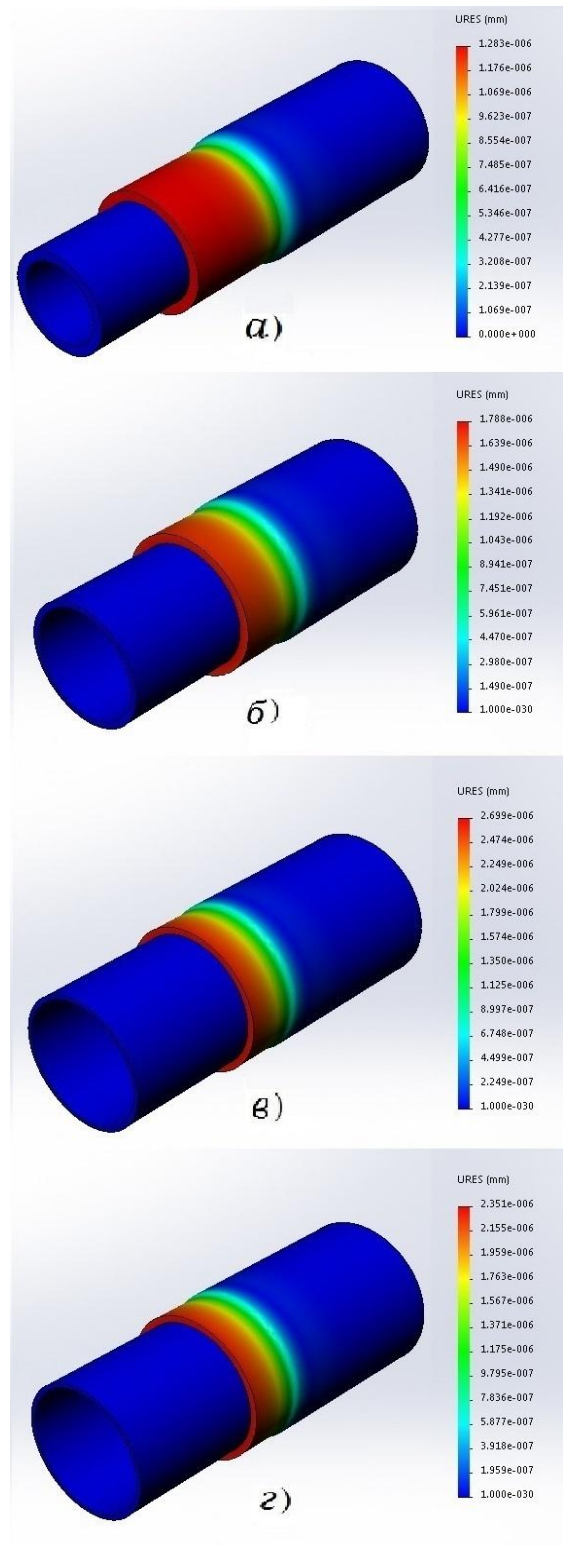


Рис.7. а) $d = 10 \times 1$; $D = 13 \times 1$; Д16+медь;

б) $d = 20 \times 1$; $D = 23 \times 1,5$; Д16+медь;

в) $d = 30 \times 1$; $D = 34 \times 1,5$; Д16+Д16;

г) $d = 30 \times 1$; $D = 34 \times 1,5$; Д16+сталь 45

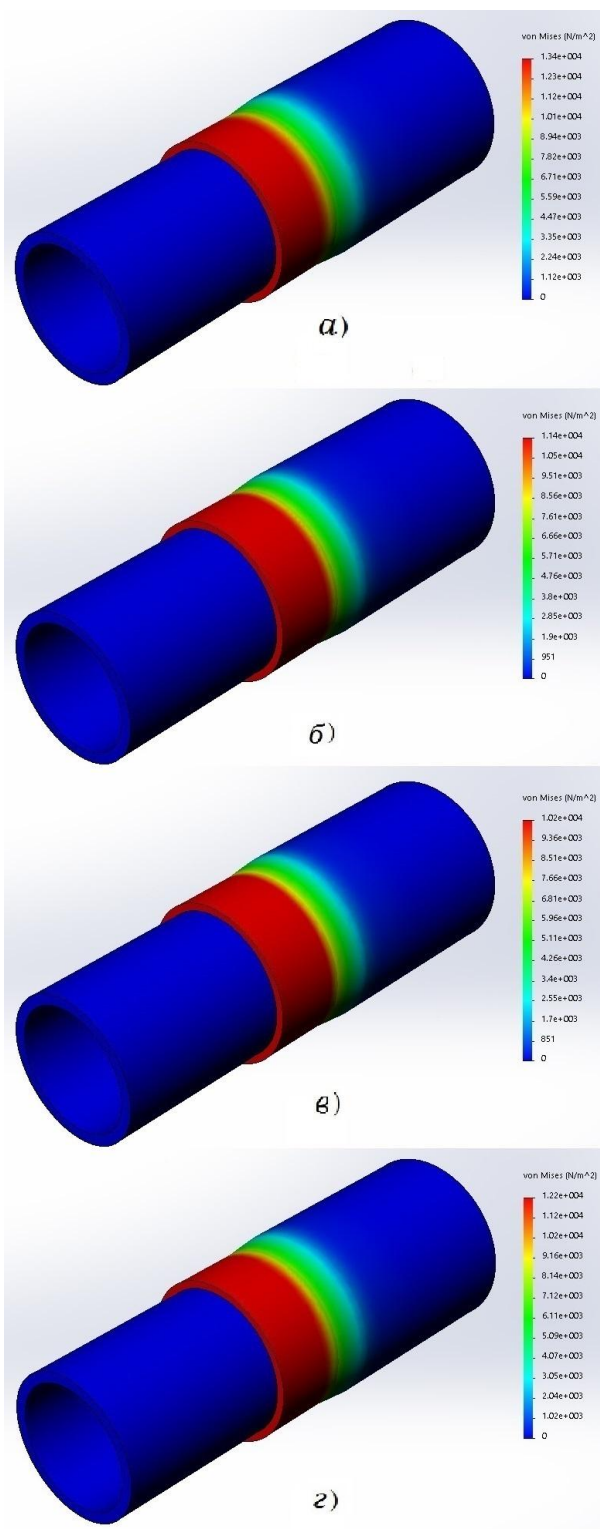


Рис.8. Моделирование сборки труб
с размерами $d=20 \times 1,5$; $D=24 \times 1,5$;
а – Д16+ 12X18Н10Т; б – Д16+ Д16;
в – Д16+ Медь; г – Д16+Сталь45

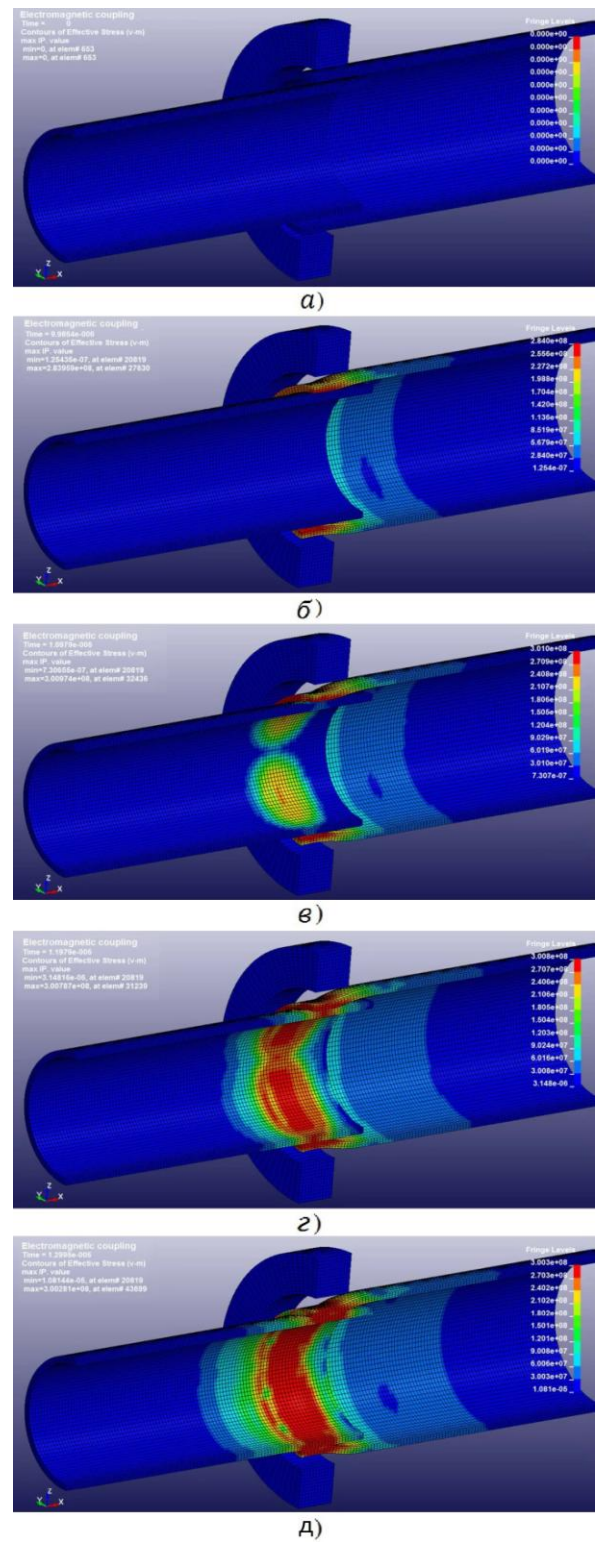


Рис.9. Контактные напряжения
а) $t=0 \mu\text{s}$; б) $t=9,9 \mu\text{s}$; в) $t=10,09 \mu\text{s}$;
г) $t=11,9 \mu\text{s}$; д) $t=12,9 \mu\text{s}$

Следует отметить, что на рис. 4, рис. 5 и в последующих мы специально не изображаем внутренние оправки, которые в реальных условиях будут при этом выполнении подобных соединений присутствовать, чтобы не произошло искажение поверхности внутренней трубы, но это учитывается при моделировании процесса в виде некоторой жесткой недеформируемой опоры.

С целью наиболее удобного анализа и наглядности итогового решения по определению зоны и значений контактных напряжений заготовки и индуктора на рис. 9 представлено возникновение контактных напряжений по времени. Для удобства и наглядности изображения и анализа цветного изображения выполнен половинчатый разрез, что позволяет увидеть возникшие к зоне образования соединений и в прилегающих к ней зонах контактные напряжения, значения которых можно определить, сравнив цвета в разрезе с расположенной справа шкалой соответствия цветовых значений. 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 возникающих между трубчатыми заготовками контактных соединений в соответствии с изменением цвета по времени. Отработка моделируемых режимов проведения технологического процесса при магнитно-импульсном воздействии деформирующего усилия велась для различных диаметров и различных вариантов сочетаний материалов соединяемых труб с варьированием деформирующего усилия давления импульсного магнитного поля.

Выводы

1. В результате выполненной работы было проведено твердотельное моделирование конструкций трубопроводов, моделирование отработки режимов процесса магнитно-импульсного деформирования, с использованием среды проектирования Autodesk Inventor, пакета HyperMesh и конечно-элементного комплекса LS-DYNA, позволяющие при варьировании параметров процесса, геометрических размеров заготовок и технологической оснастки определить требуемые значения перемещений стенки заготовки и эффективно отработать режимы сборки трубчатых заготовок с требуемыми формами поверхностей, размерами деталей и заданными характеристиками материалов.

2. 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.

3. Моделирование процесса соединения трубчатых заготовок давлением импульсного магнитного поля позволяет подобрать эффективные с точки зрения качества соединений режимы деформирования для образования требуемых параметров в холодном состоянии в зонах контакта трубчатых конструкций.

Библиографический список

1. Анкудинов И.Н., Лобанов В.С., Присняков В.Ф., Клочко О.Г. Технология изготовления трубопроводов летательных аппаратов: Учебное пособие.– М.: Машиностроение, 1985. – 160 с.

2. Стаценко, В.Н. Специальные методы сварки: Учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 165 с.
3. Стройман И.М. Холодная сварка металлов. – Л.: Машиностроение, 1985. - 224 с.
4. Дудин А.А. Магнитно-импульсная сварка металлов. - М.: Metallurgy, 1979. - 128 с.
5. Феоктистов С.И., Макарова Е.А., Меркулов В.И. Автоматизация технологической подготовки производства летательных аппаратов. – М.: Изд-во «ЭКОМ», 2001. – 288 с.
6. Астапов В.Ю., Усачев Е.В. Некоторые вопросы разработки и исследования техпроцесса изготовления осесимметричных деталей ЛА и применение автоматизированного проектирования оснастки // Научные труды МАТИ им. К.Э. Циолковского. 2001. № 4 (76). С. 315-320
7. Астапов В.Ю., Джоздани М.С. Влияние параметров магнитно-импульсной формовки окантовок люков на их характеристики // Кузнечно-штамповочное производство. 2011. №12. С. 14-18.
8. Khoroshko L., Sukhova T. Application of computer aided design (CAD) systems for development of electronic educational courses for engineering disciplines in engineering higher educational institution. Proceedings of IEEE Educon 2013, Berlin, Germany 2013 p. 644-647.
9. Джоздани М.С., Афшари П. Моделирование магнитно-импульсного формообразования и сборки трубчатых конструкций // Кузнечно-штамповочное производство. 2015. №2. С. 40-43.

10. Зарецкий М.В., Сидоренко А.С. Моделирование динамического напряженного состояния конструкции авиационного изделия при случайном нагружении // Труды МАИ, 2014, № 75:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49667>