

Метод анализа характеристик локального НДС незагруженного заклепочного соединения с помощью CAD/CAE системы Abaqus

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Разработан метод анализа характеристик локального НДС в незагруженных заклепочных соединениях, выполненных заклепками ОСТ 111781-74 и АНУ0348 с применением совмещенного лагранжево-эйлерового (CLE) конечно-элементного подхода, реализованного в CAD/CAE системе Abaqus. Проведен сравнительный анализ характеристик НДС в конечно-элементных моделях исследуемых заклепочных соединений при использовании лагранжевой и совмещенной лагранжево-эйлеровой конечно-элементной формулировок задачи. Предложена трехмерная конечно-элементная модель на основании CLE метода для дальнейших исследований усталостной прочности и долговечности нагруженных заклепочных соединений.

Ключевые слова: незагруженное заклепочное соединение, потайная заклепка с коническим компенсатором, заклепка с уменьшенной плоско-выпуклой головкой, характеристики НДС заклепочного соединения, натяг, контактное давление, совмещенный лагранжево-эйлеров конечно-элементный подход.

В процессе клепки заклепочного соединения материал заклепки претерпевает большие пластические деформации, что приводит к трудностям при численном моделировании трехмерной задачи процесса клепки с использованием метода конечных элементов в лагранжевой постановке.

В работах [2] и [3] рассмотрено моделирование процесса клепки заклепочных соединений в осесимметричной постановке с применением конечно-элементной модели на основании подхода Лагранжа. При использовании лагранжевого подхода для описания поведения сплошной среды характеристики материалов модели привязываются к соответствующим элементам модели в данный момент времени и разрешаются уравнения сплошной среды, записываемые для узлов конечно-элементной модели. При моделировании процесса клепки лагранжевы конечные элементы (КЭ) заклепки деформируются и перемещаются вместе с присвоенным им материалом. Такая постановка задачи дает преимущества в исследовании изменения параметров модели во времени, но при больших деформациях не всегда позволяет получить сходимость задачи при требуемой точности решения задачи, а также достоверные результаты по формоизменению модели вследствие искажения и вырождения КЭ сетки.

Помимо подхода Лагранжа, для изучения поведения сплошной деформируемой среды существует подход Эйлера, в котором характеристики материала привязываются к точке пространства, в которой в данный момент находится частица модели. Объектом изучения являются различные поля, характеризующие движение сплошной среды. В отличие от лагранжевой постановки при подходе Эйлера исследуется неподвижное пространство модели, заполненное движущейся средой (средами). В этом случае эйлерова сетка конечно-элементной модели остается неизменной во времени и не искажается вместе с материалом, так как узлы эйлеровой сетки зафиксированы в моделируемом пространстве. При этом каждый КЭ эйлеровой сетки в конкретный момент времени может обладать свойствами той или иной материальной среды (в частности, свойствами материала деформируемой заклепки) либо принадлежать пустому пространству. В ходе решения при эйлеровом подходе рассмотрено движение деформируемой сплошной среды (или нескольких

различных сред) внутри эйлеровой сетки КЭ. В результате становится возможным при численном моделировании процесса клепки заклепочного соединения решить проблемы, связанные с искажением и вырождением КЭ сетки. Таким образом, эйлерова постановка метода конечных элементов целесообразна при моделировании технологических процессов, для которых характерны большие пластические деформации.

Для дальнейших исследований характеристик усталостной прочности и долговечности различных типовых заклепочных соединений осесимметричная постановка задачи неприменима, и возникает необходимость в рассмотрении технологического процесса клепки заклепочного соединения и дальнейшего его нагружения в трехмерной постановке. Решение такой задачи полностью в лагранжевой формулировке требует больших затрат времени на этапе построения конечно-элементной сетки для предотвращения вырождения элементов во время расчета и, как следствие, проблем со сходимостью задачи. Вместе с тем для описания соединяемых деталей в конечно-элементных моделях заклепочного соединения применение сеток Эйлера нецелесообразно в силу малых деформаций, возникающих в соединяемых элементах, поэтому конечно-элементные модели соединяемых деталей имеет смысл строить на основе сеток Лагранжа.

Совмещенный лагранжево-эйлеровый (CLE) конечно-элементный подход является мощным инструментом при численном моделировании процессов, связанных с большими деформациями, разрушением материалов или поведением жидких сред.

Целью работы является разработка метода анализа характеристик локального НДС в незагруженном заклепочном соединении с применением совмещенного лагранжево-эйлерового (CLE) конечно-элементного подхода, реализованного в CAD/CAE системе Abaqus [7].

Метод анализа характеристик локального НДС в незагруженном заклепочном соединении с применением совмещенного лагранжево-эйлерового (CLE) конечно-элементного подхода включает в себя следующие этапы:

- 1) создание трехмерных CAD моделей заклепки, соединяемых деталей, штампов, а также эйлеровой области для описания поведения заклепки в процессе клепки;
- 2) разработку расчетной схемы заклепочного соединения;
- 3) задание физико-механических характеристик материалов и присвоение их соответствующим элементам модели;
- 4) создание сборки всех компонентов модели заклепочного соединения;
- 5) создание конечно-элементной сетки на базе созданных CAD моделей соединяемых элементов, штампов, а также для эйлеровой области;
- 6) назначение КЭ эйлеровой конечно-элементной сетки, совпадающих с геометрией заклепки, механических свойств материала заклепки с помощью инструмента Volume fraction tools;
- 7) задание шагов нагружения и их продолжительности;
- 8) создание общего контакта элементов модели с указанием контактных пар и соответствующих коэффициентов трения;
- 9) задание граничных условий согласно расчетной схеме;
- 10) решение задачи;
- 11) анализ характеристик локального НДС рассматриваемой модели заклепочного соединения.

В работе рассмотрены заклепочные соединения, выполненные заклепками ОСТ 1 11781-74 [4] и АНУ0348 [2] диаметром 4 мм. Заклепку с уменьшенной плоско-выпуклой головкой по ОСТ 1 11781-74 применяют для выполнения соединений при использовании различных конструктивно-технологических методов восстановления характеристик работоспособности сборных панелей крыла с усталостными трещинами [3]. Потайная заклепка АНУ0348 с нормальной высотой закладной головки и коническим компенсатором предназначена для выполнения потайных заклепочных соединений элементов крыла самолета без осуществления операции фрезерования закладной головки после клепки [2].

Геометрические параметры исследуемых образцов заклепочного соединения и применяемых заклепок показаны на рис. 1 и 2.

Для определения характеристик локального НДС заклепочного соединения после операции клепки разработана расчетная схема для исследуемых заклепочных соединений, показанная на рис. 3. С учетом геометрической и силовой симметрии образцов, а также изотропности свойств материала моделировани 1/4 часть образца заклепочного соединения. Действие отброшенных частей компенсировалось заданием соответствующих граничных условий симметрии.

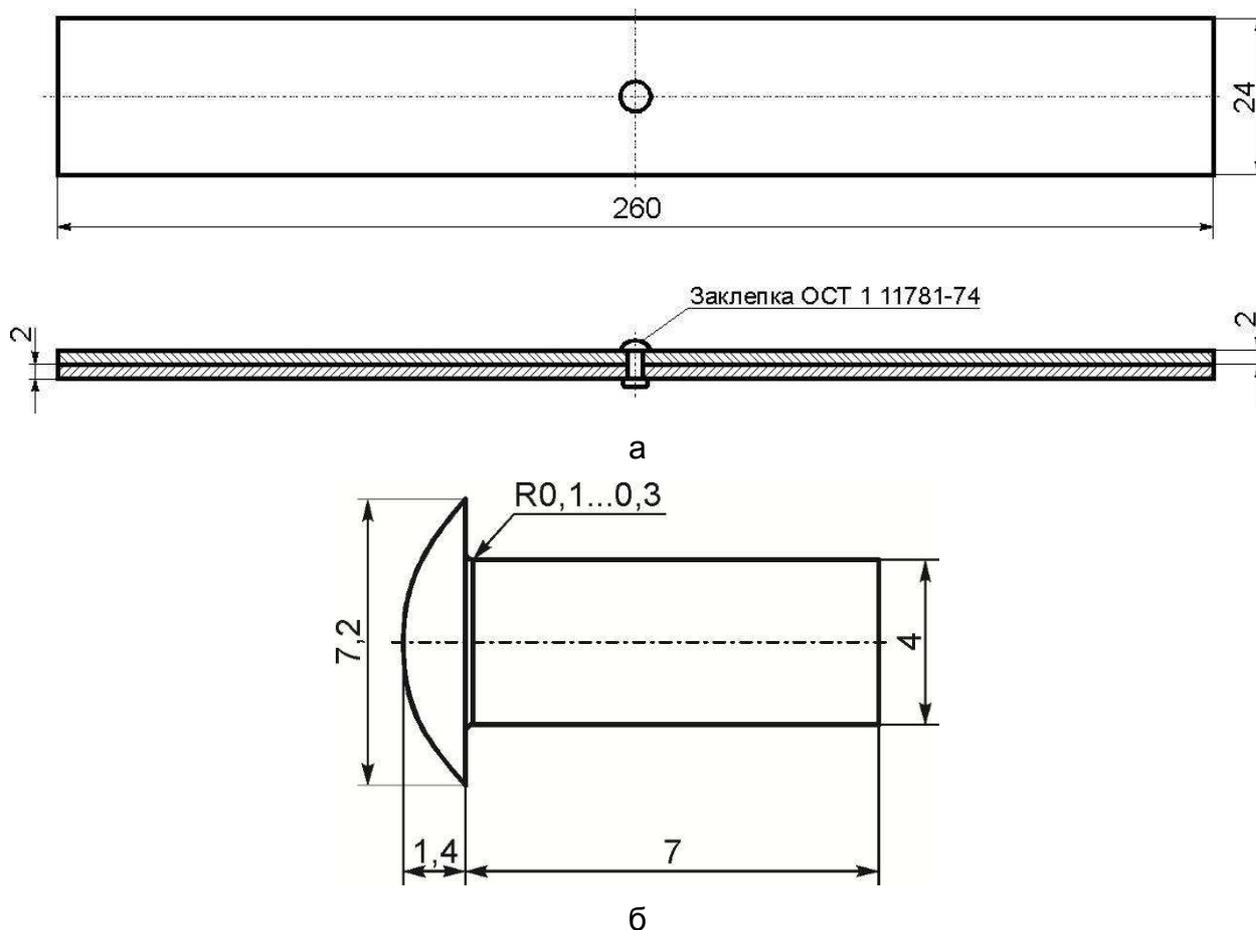


Рис. 1. Геометрические параметры образца заклепочного соединения, выполненного заклепкой ОСТ 1 11781-74:

а – заклепочное соединение, выполненное заклепкой ОСТ 1 11781-74;

б – геометрические параметры заклепки ОСТ 1 11781-74

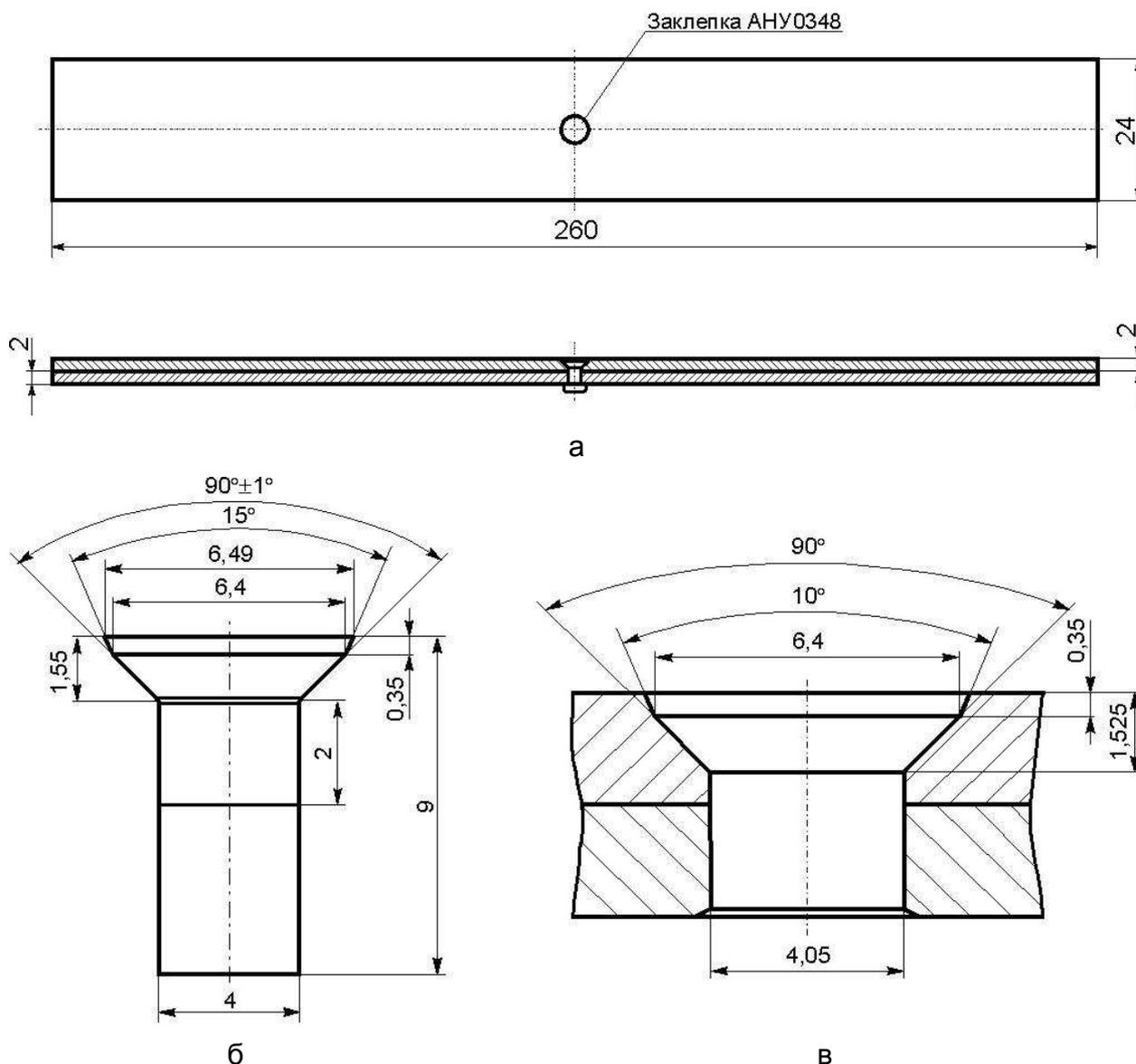


Рис. 2. Геометрические параметры образца заклепочного соединения, выполненного потайной заклепкой АНУ0348:

- а – заклепочное соединение, выполненное потайной заклепкой АНУ0348;
- б – геометрические параметры потайной заклепки АНУ0348;
- в – геометрические параметры гнезда под установку потайной заклепки АНУ0348

Согласно разработанной расчетной схеме с помощью системы Abaqus создана конечно-элементная модель (рис. 4) рассматриваемых в работе заклепочных соединений.

При построении конечно-элементной модели заклепочных соединений для заклепок использовали эйлеровы КЭ. Область эйлеровых конечных элементов не совпадает с геометрией заклепки и представляет собой простейшее геометрическое тело, дискретизированное гексагональными эйлеровыми элементами EC3D8R, представленными в библиотеке элементов системы Abaqus. Геометрия заклепки определяется путем назначения элементам эйлеровой сетки механических свойств материала заклепки.

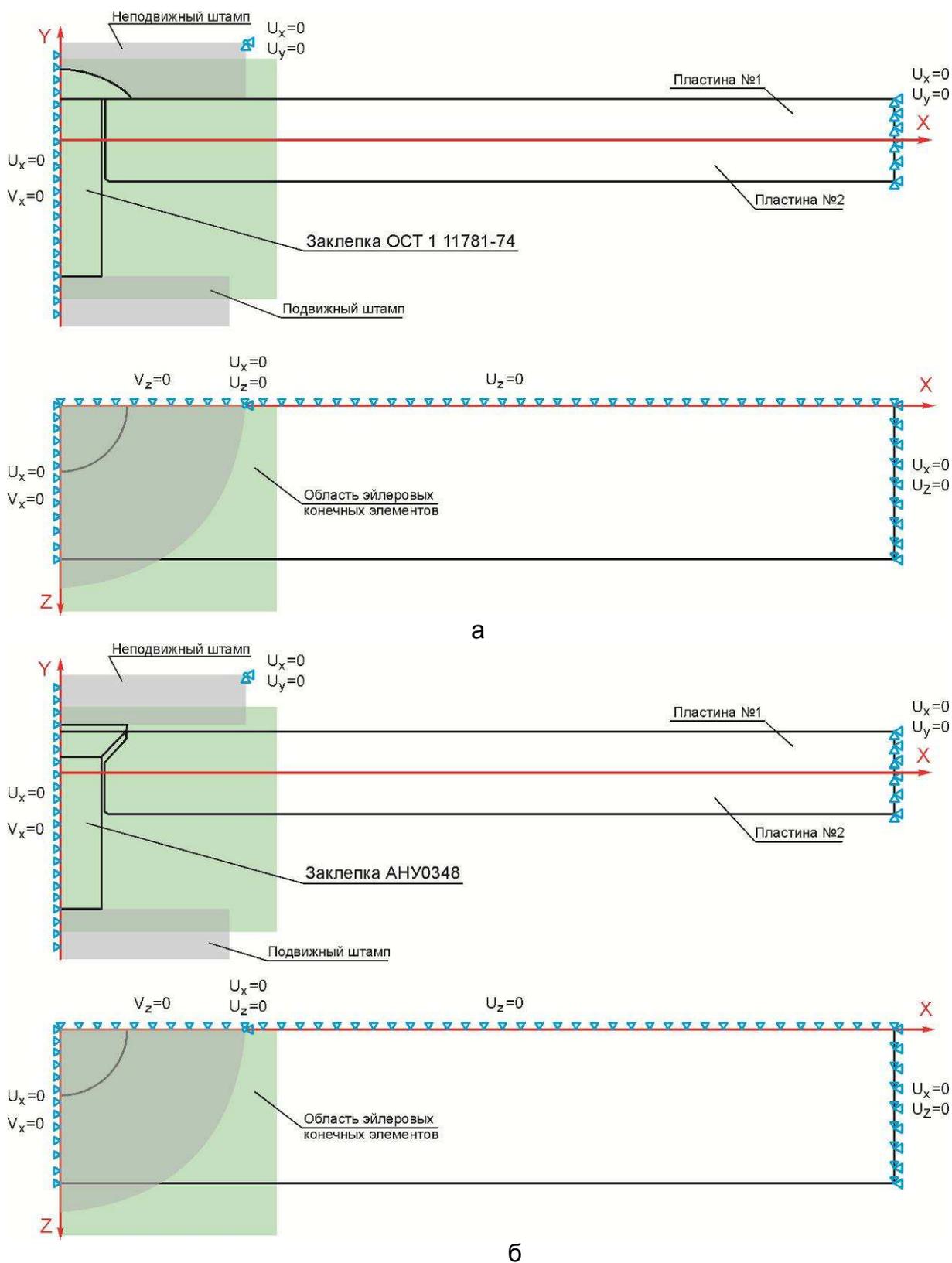


Рис. 3. Расчетная схема, разработанная для рассматриваемого заклепочного соединения:

а – заклепочное соединение, выполненное заклепкой ОСТ 1 11781-74;

б – заклепочное соединение, выполненное потайной заклепкой АНУ0348

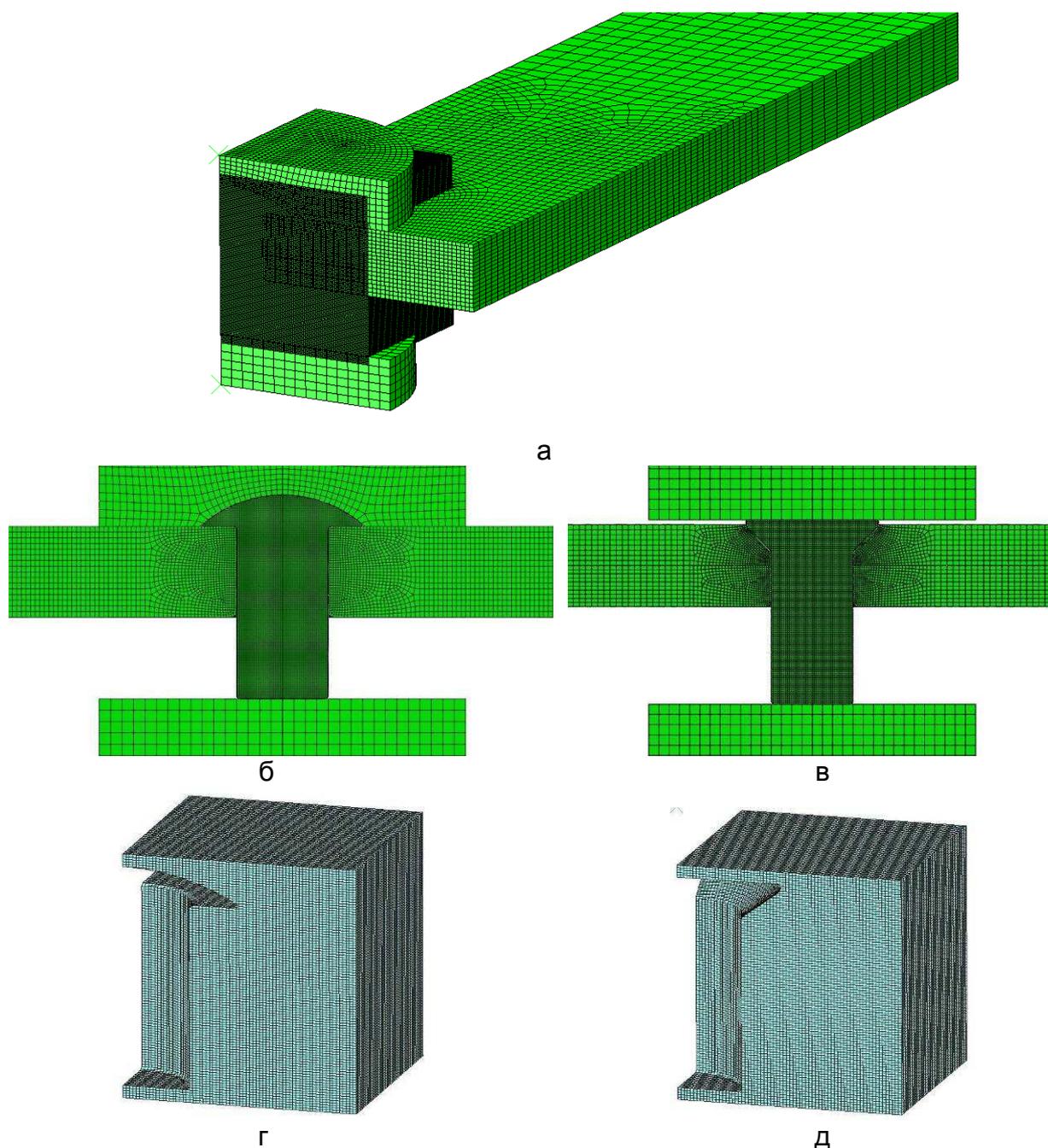


Рис. 4. Конечно-элементные модели заклепочных соединений в лагранжево-эйлеровой конечно-элементной постановке:

- а – общий вид конечно-элементной модели заклепочного соединения;
- б – поперечное сечение КЭ модели заклепочного соединения, выполненного заклепкой ОСТ 1 11781-74;
- в – поперечное сечение КЭ модели заклепочного соединения, выполненного заклепкой АНУ0348;
- г – область эйлеровой КЭ сетки, не заполненная материалом заклепки ОСТ 1 11781-74;
- д – область эйлеровой КЭ сетки, не заполненная материалом потайной заклепки АНУ0348

Свойства материала задавались элементам эйлеровой сетки с помощью специального инструмента задания объемной доли (volume fraction tool), доступного в системе Abaqus. Данный инструмент определяет пересечение между эйлеровой сеткой и геометрией заклепки и создает дискретное поле, которое связывает каждый элемент эйлеровой сетки с объемной долей, занимаемой заклепкой внутри каждого элемента. При этом элементы могут быть частично или полностью пустыми. Область эйлеровых элементов показана на рис. 4, а. Области эйлеровых конечно-элементных сеток, не заполненные материалом заклепок, изображены на рис. 4, г, д.

Конечно-элементная сетка для моделей соединяемых пластин, верхнего и нижнего штампов построена с использованием гексагональных лагранжевых конечных элементов C3D8R, представленных в библиотеке элементов системы Abaqus. По причине большей жесткости материала штампов по сравнению с материалом заклепки конечно-элементные модели штампов смоделированы как “абсолютно жесткие” (rigid body constrain). Контактное взаимодействие лагранжевых конечных элементов и области эйлеровой конечно-элементной сетки реализовано как общий контакт (general contact) с помощью метода “штрафного” контакта (penalty contact algorithm).

Поскольку в процессе клепки в локальных зонах заклепочного соединения возникают пластические деформации, для описания закона поведения материала выбрана полилинейная упругопластическая модель поведения материала. В конечно-элементных моделях заклепочного соединения использовали следующие характеристики материалов:

1) материал заклепок – алюминиевый сплав В65 с модулем упругости $E = 71000 \text{ МПа}$ и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,3$;

2) материал соединяемых пластин – алюминиевый сплав Д16АТ с модулем упругости $E = 72000 \text{ МПа}$ и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,3$.

При создании контактных пар в расчетной модели было учтено трение путем задания коэффициента сухого трения скольжения между контактируемыми поверхностями модели:

- $\nu = 0,15$ – между заклепкой и поверхностью отверстия;
- $\nu = 0,65$ – между заклепкой и штампами;
- $\nu = 0,94$ – между пластинами.

С помощью созданных конечно-элементных моделей моделировался процесс клепки и отвода штампов путем перемещения “подвижного” штампа (см. рис. 3) до образования замыкающей головки заклепки высотой $0,4 \cdot d_{\text{закл}}$, что соответствует требованиям ОСТ 1 34102-80 и ПИ 249-2000 [5] на выполнение заклепочных соединений. Процесс клепки рассматривали как квазистатический в явной постановке.

В данной работе исследовали численное моделирование только процесса клепки заклепочных соединений. Основными параметрами, рассматриваемыми при анализе НДС заклепочного соединения, приняты величина радиального натяга по контуру отверстия, высота выступания закладной головки заклепки (качество внешней поверхности) для потайного заклепочного соединения и величина контактных давлений по всей толщине заклепочного соединения в зоне контакта заклепки с поверхностью отверстия. Перечисленные выше параметры получены

для задачи в трехмерной постановке с применением КЭ модели на основании совмещенного лагранжево-эйлерового подхода. Выполнено качественное сравнение полученных результатов с результатами, приведенными в работе [2], для данной задачи, рассматриваемой в осесимметричной постановке с применением лагранжевого конечно-элементного подхода.

Анализ результатов показал, что после клепки высота замыкающей головки непотайной заклепки по ОСТ 1 11781-74 составляет 1,599 и 1,596 мм для CLE метода и задачи в лагранжевой постановке соответственно. Величина выступания закладной головки потайной заклепки АНУ0348 после процесса клепки составила 0,0463 и 0,042 мм соответственно для CLE метода и задачи в лагранжевой постановке.

Характер распределения радиального натяга по толщине пакета для рассматриваемых заклепочных соединений при лагранжевой и лагранжево-эйлеровой формулировках задачи показан на рис. 5, 6. На рис. 5 и 6 приняты следующие обозначения: 1 – радиальный натяг в продольном направлении модели (вдоль оси X) для CLE метода, 2 – радиальный натяг в поперечном направлении модели (вдоль оси Z) для CLE метода, 3 – радиальный натяг для осесимметричной модели заклепочного соединения в лагранжевой постановке задачи.

Распределение контактных давлений по контуру отверстия заклепочного соединения, выполненного заклепками ОСТ 1 11781-74 и АНУ0348, показано на рис. 7, 8. На рис. 7 и 8 приняты следующие обозначения: 1 – контактное давление для CLE метода, 2 – контактное давление для осесимметричной модели заклепочного соединения в лагранжевой постановке задачи.

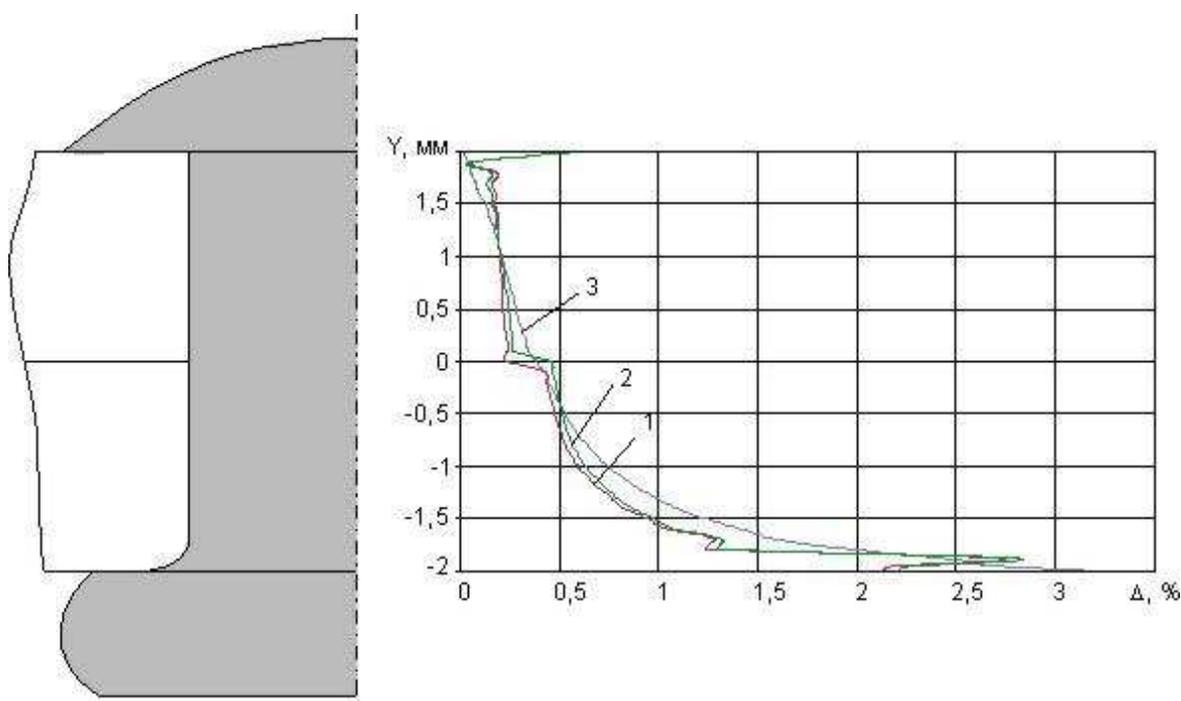


Рис. 5. Распределение радиального натяга по толщине пакета для заклепочного соединения, выполненного заклепкой ОСТ 1 11781-74

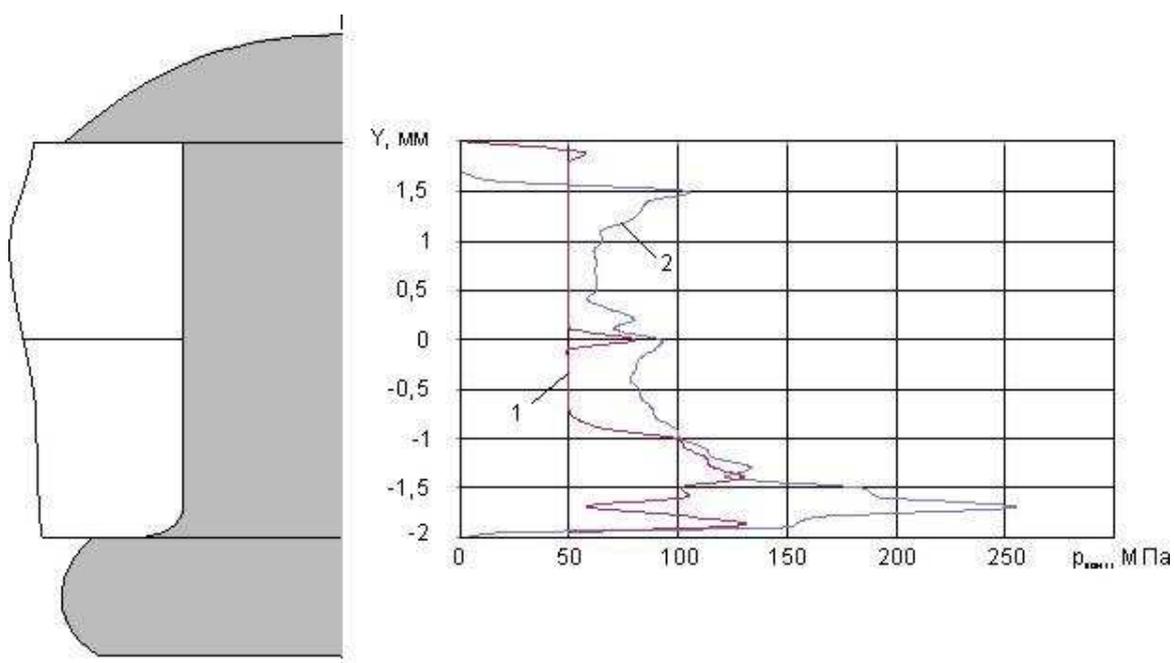


Рис. 6. Распределение радиального натяга по толщине пакета для заклепочного соединения, выполненного потайной заклепкой АНУ0348

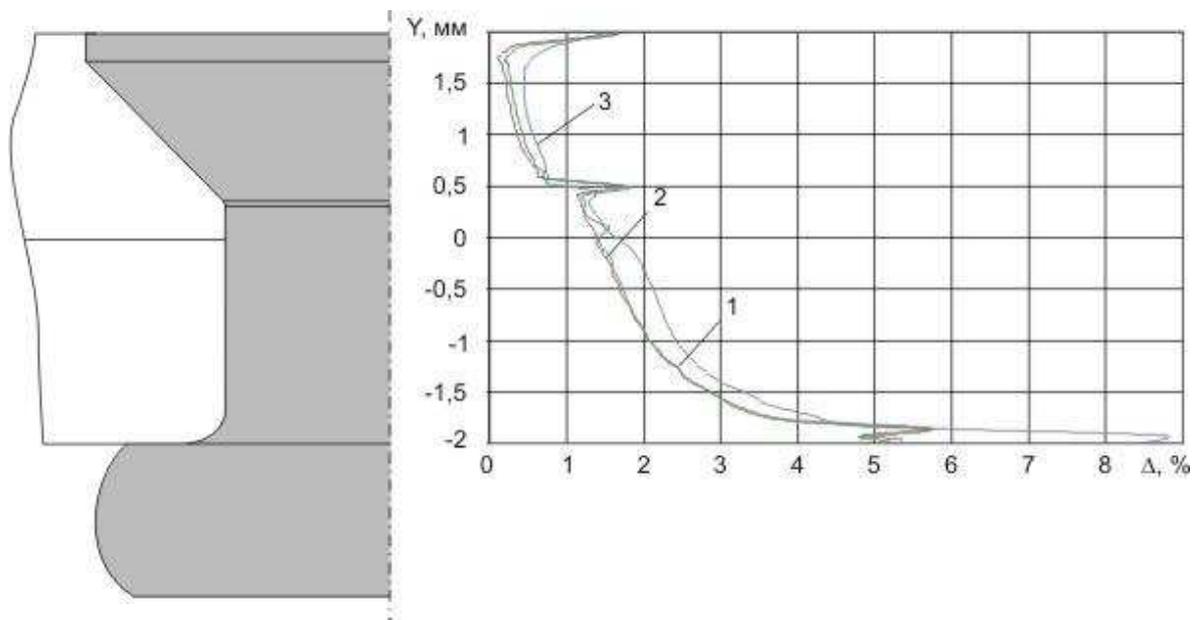


Рис. 7. Распределение контактных давлений по контуру отверстия для заклепочного соединения, выполненного заклепкой ОСТ 1 11781-74

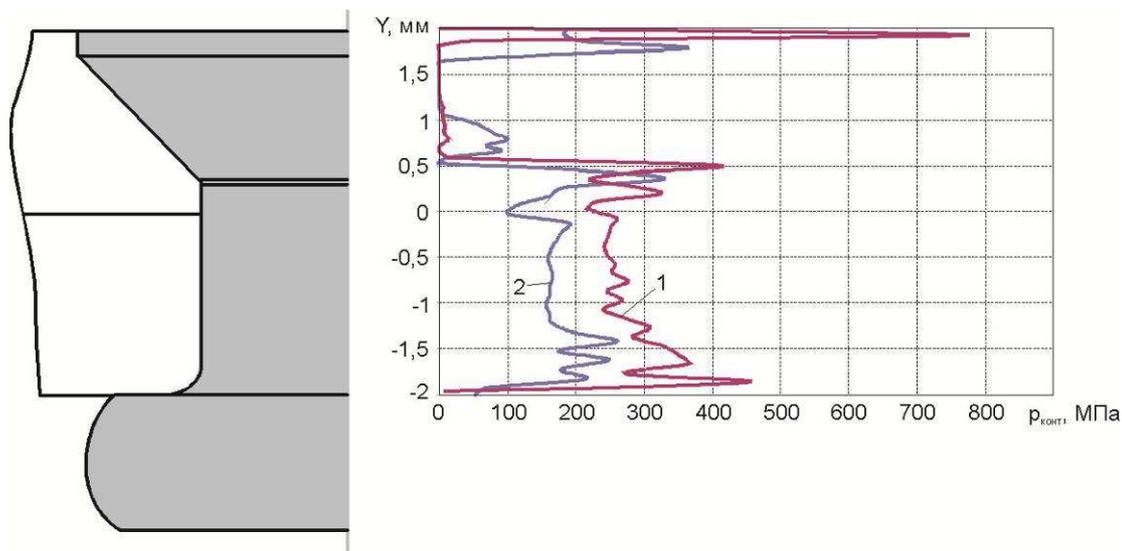


Рис. 8. Распределение контактных давлений по контуру отверстия для заклепочного соединения, выполненного потайной заклепкой АНУ0348

На основе полученных данных можно сделать вывод, что исследуемые параметры локального НДС заклепочного соединения, приведенные в работе [2] для задачи в осесимметричной постановке с применением лагранжевого конечно-элементного подхода и полученные для заклепочного соединения в трехмерной постановке с использованием CLE метода, по характеру распределения и граничным значениям отличаются незначительно, что свидетельствует о возможности применения предложенной трехмерной конечно-элементной модели на основе CLE метода для дальнейших исследований усталостной прочности и долговечности рассматриваемых заклепочных соединений.

На рис. 9 – 12 показан характер распределения эквивалентных напряжений Мизеса в рассматриваемых заклепочных соединениях.

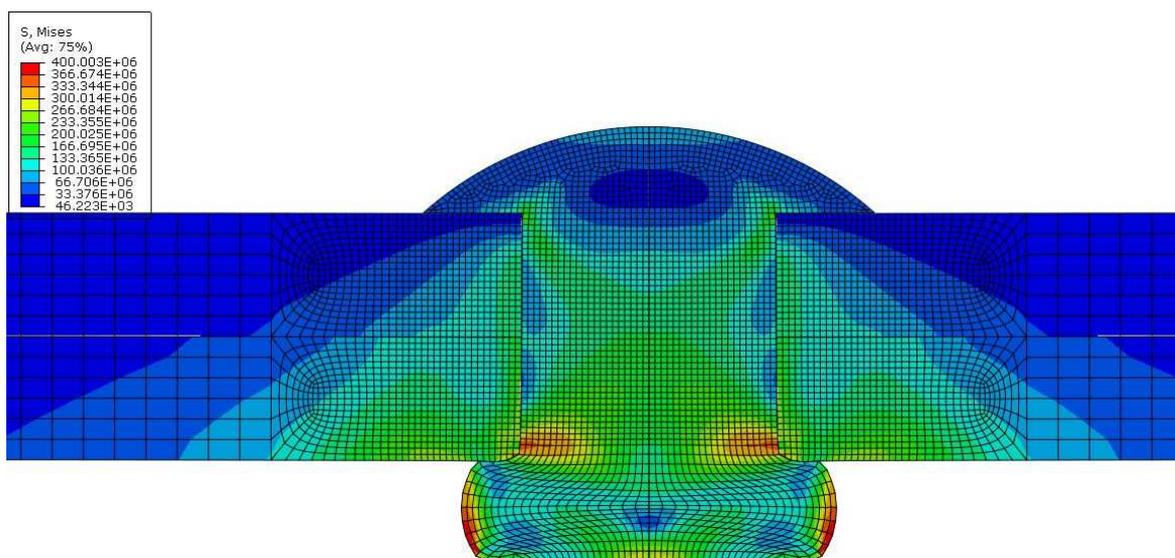
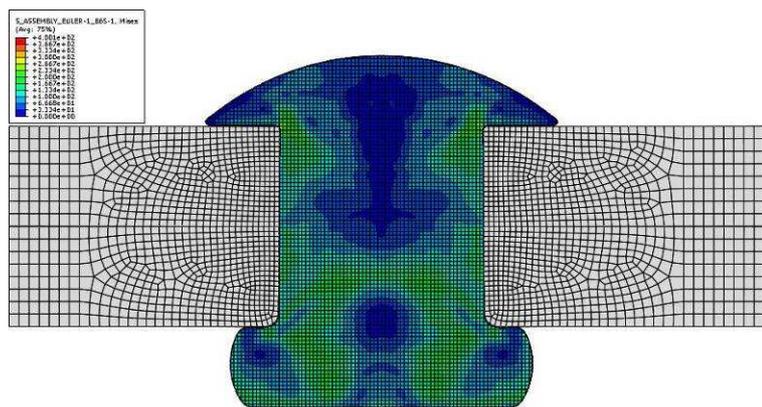
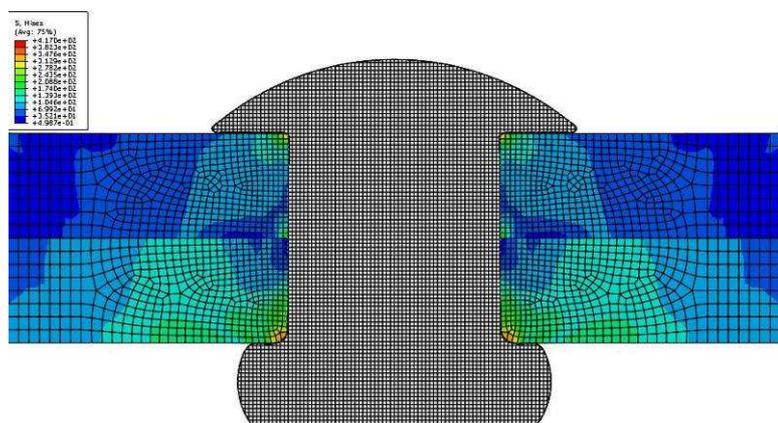


Рис. 9. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в непотайном заклепочном соединении при использовании лагранжевого конечно-элементного подхода



а



б

Рис. 10. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в непотайном заклепочном соединении при использовании CLE конечно-элементного метода:
 а – эквивалентные напряжения Мизеса в заклепке;
 б – эквивалентные напряжения Мизеса в пластинах

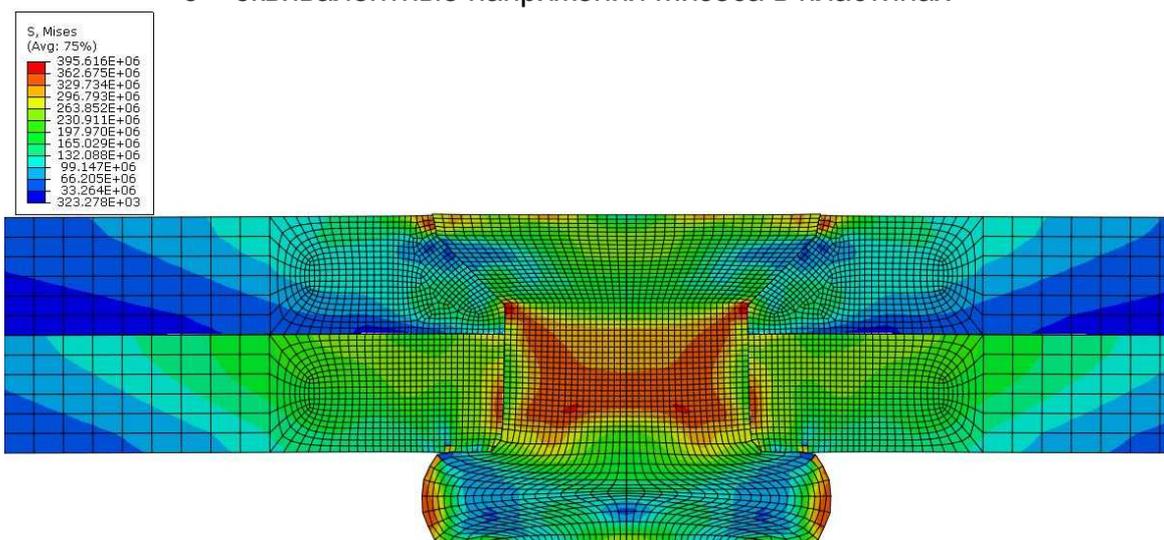
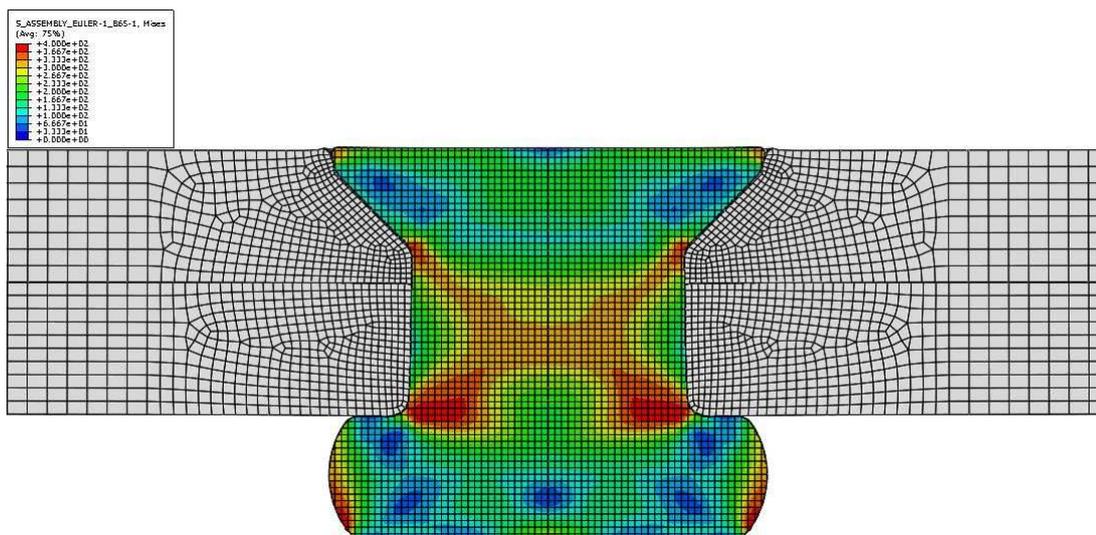
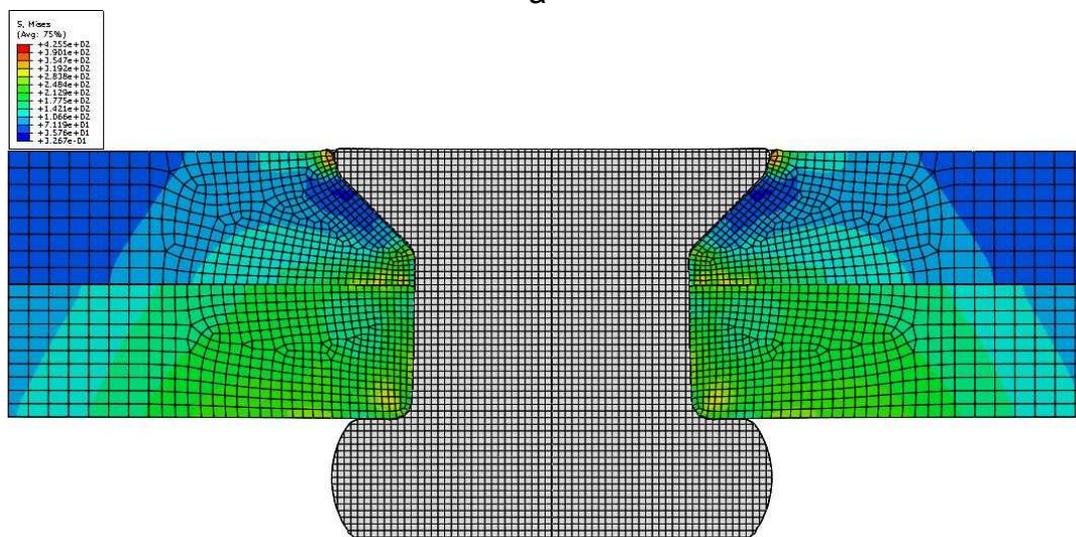


Рис. 11. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в потайном заклепочном соединении при использовании лагранжевого конечно-элементного подхода



а



б

Рис. 12. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в потайном заклепочном соединении при использовании CLE конечно-элементного метода:
 а – эквивалентные напряжения Мизеса в заклепке;
 б – эквивалентные напряжения Мизеса в пластинах

Выводы

1. Разработан метод анализа характеристик локального НДС в незагруженном заклепочном соединении с применением совмещенного лагранжево-эйлерового (CLE) конечно-элементного подхода, реализованного в системе Abaqus.

2. Проведен сравнительный анализ характеристик НДС в элементах заклепочных соединений, выполненных заклепками ОСТ 1 11781-74 и АНУ0348, при использовании лагранжевой и совмещенной лагранжево-эйлеровой конечно-элементной формулировок задачи.

3. На основе проведенного анализа полученных результатов определено, что совмещенный лагранжево-эйлеров метод (CLE), реализованный в CAD/CAE

системе Abaqus, позволяет решать задачи, связанные с большими деформациями, обеспечивая при этом отличную сходимость, достоверные результаты по формоизменению модели заклепки в процессе клепки и необходимую точность выходных параметров рассматриваемой задачи вследствие отсутствия искажения и вырождения КЭ сетки.

В вычислительном аспекте реализация CLE-метода осложнена, поскольку помимо КЭ моделей соединяемых пластин и технологического инструмента приходится рассматривать модель некоторого объема пространства, в котором ожидается деформация металла заклепки, а также моделировать контактное взаимодействие лагранжевых и эйлеровых элементов. Все эти условия приводят к увеличению размерности задачи и, как следствие, к ее усложнению.

В то же время совмещенный лагранжево-эйлеров конечно-элементный подход при численном моделировании поведения деформируемого твердого тела имеет ряд ключевых преимуществ. Одним из основных преимуществ подхода при моделировании заклепочных соединений является удобство описания контактных границ между контактируемыми элементами рассматриваемой конечно-элементной модели. Применение же эйлеровых элементов позволяет описать поведение заклепки в трехмерной постановке в процессе клепки без возникновения больших искажений и переклестов элементов заклепки, что может наблюдаться при использовании в модели только лагранжевых элементов. Применение совмещенного лагранжево-эйлерового (CLE) подхода позволяет избегать трудностей, возникающих при использовании отдельно лагранжевого или эйлерового подходов, объединяя достоинства обоих методов.

4. Анализ полученных данных показал, что исследуемые параметры локального НДС заклепочного соединения, приведенные в работе [2] для задачи в осесимметричной постановке с применением лагранжевого конечно-элементного подхода и данные, полученные для заклепочного соединения в трехмерной постановке с использованием CLE метода, по характеру распределения и граничным значениям параметров отличаются незначительно, что свидетельствует о возможности дальнейшего применения предложенной трехмерной конечно-элементной модели на основе CLE метода для дальнейших исследований усталостной прочности и долговечности рассматриваемых заклепочных соединений.

Список литературы

1. А.Г. Гребеников Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций [Текст] / А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-та «ХАИ», 2006 – 532 с.
2. Кива, Д.С. Разработка прогрессивной потайной заклепки с коническим компенсатором для выполнения соединений силовых элементов крыла [Текст] / Д.С. Кива, С.А. Бычков, А.Г. Гребеников, Е.Т. Василевский, Д.Ю. Дмитренко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 37. Х., 2007. – С. 183 - 201.
3. Гребеников А.Г. Анализ влияния деградации механических свойств материала панели планера ЛА на характер изменения характеристик НДС в растянутой панели с усталостной трещиной и установленной ремонтной накладкой [Текст] / А.Г. Гребеников, Д.Ю. Дмитренко, Д.В. Хмелик // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр.

- Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 54. X., 2012. – С. 27 - 41.
4. ОСТ 1 11781-74. Заклепки с уменьшенной плоско-выпуклой головкой. Конструкция и размеры.
 5. ПИ 249-2000. Клепка металлических конструкций заклепками. – М.: НИАТ, 2000. – 151 с.
 6. ТИ 36-21-86. Выполнение высокоресурсных герметичных соединений заклепками с компенсатором. – К.: КМЗ, 1986, – 15 с.
 7. Abaqus 6.12: Documentation.

Рецензент: кандидат технических наук, доцент Василевский Е.Т.,
Государственное предприятие “АНТОНОВ”
Поступила в редакцию 03.12.12

Метод аналізу характеристик локального НДС ненавантаженого заклепочного з'єднання за допомогою CAD/CAE системи Abaqus

Розроблено метод аналізу характеристик локального НДС у ненавантажених заклепочних з'єднаннях виконаних заклепками ОСТ 1 11781-74 і АНУ0348 із застосуванням суміщеного лагранжево-ейлерового скінченно-елементного підходу, реалізованого в CAD/CAE системі Abaqus. Проведено порівняльний аналіз характеристик НДС в скінченно-елементних моделях досліджуваних заклепочних з'єднань при використанні лагранжевого і суміщеного лагранжево-ейлерового скінченно-елементних формулювань задач. Запропоновано тривимірну скінченно-елементну модель на підставі CLE методу для подальших досліджень втомної міцності й довговічності навантажених заклепочних з'єднань.

Ключові слова: ненавантажене заклепочне з'єднання, потайна заклепка з конічним компенсатором, заклепка зі зменшеною плоско-выпуклою головкою, характеристики НДС заклепочного з'єднання, натяг, контактний тиск, суміщений лагранжево-ейлеровий підхід.

The method for analyzing of unloaded riveted joint's stress-strain state characteristics using CAD/CAE system Abaqus

The method for analyzing of stress-strain state characteristics of unloaded riveted joints performed with OST 1 11781-74 and ANU0348 rivets has been developed using Coupled Euler-Lagrange finite element approach implemented in the CAD / CAE system Abaqus. A comparative analysis of the stress-strain state characteristics of the examined riveted joint's finite element models using the Lagrangian and the Coupled Lagrangian-Eulerian finite element approaches has been conducted. A three-dimensional finite element model based on the CLE method has been proposed for further study of fatigue strength and durability of the loaded riveted joints.

Keywords: unloaded riveted joint, countersunk rivet with tapered compensator, rivet with reduced round head, riveted joint's stress-strain state characteristics, interference, contact pressure, coupled Lagrangian-Eulerian approach.