

Методика определения характеристик локального НДС и податливости элементов срезного соединения заклепками с корончатым и цилиндрическим компенсаторами

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

В конструкции сборных панелей крыла самолета Ан-74 для соединений стрингеров с обшивкой в регулярной части межнервюрной зоны применяются соединения заклепками по ОСТ 1 34052-85 (рис. 1).

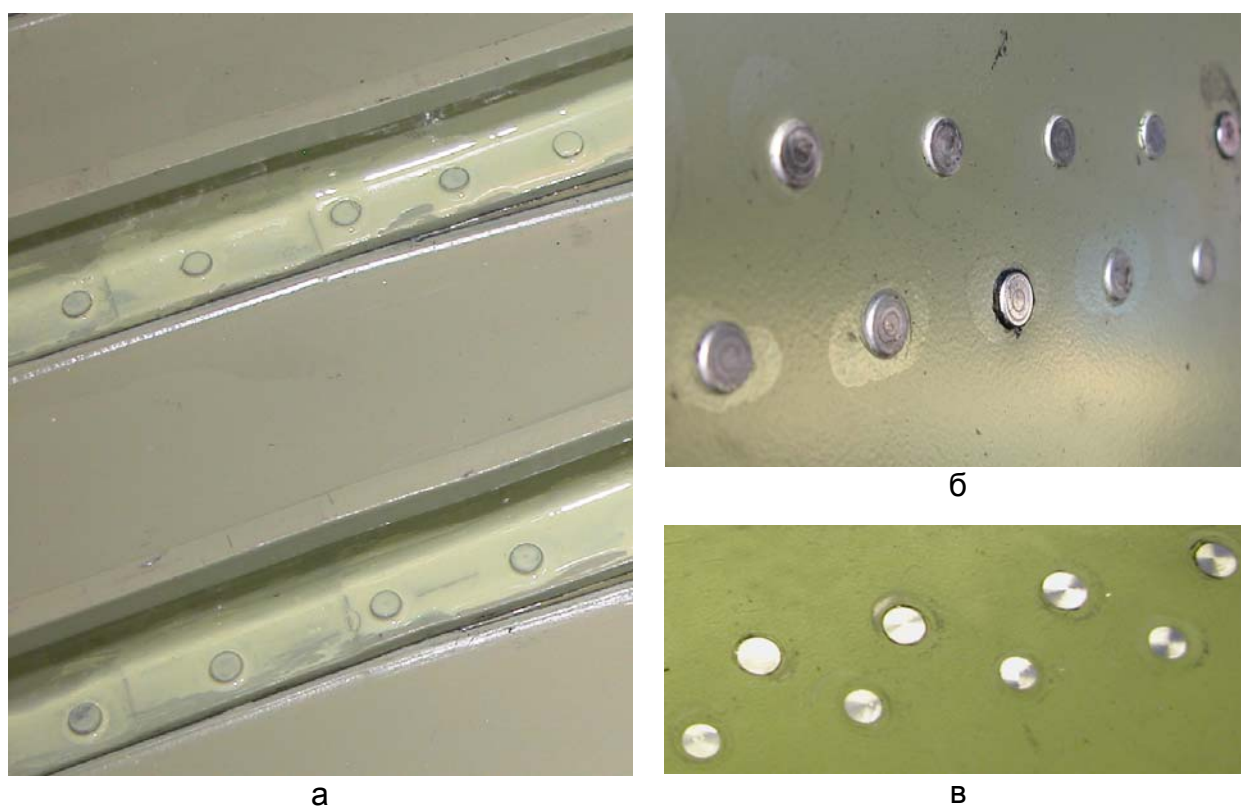


Рис. 1. Фрагмент сборной панели крыла самолета Ан-74. Соединения стрингеров с обшивкой выполнено заклепками по ОСТ 1 34052-85: а – вид со стороны замыкающих головок; б – закладные головки заклепок после клепки до фрезерования; в – закладные головки заклепок после фрезерования

Особенностью соединений, выполненных заклепками с корончатым компенсатором по ОСТ 1 34052-85, является то, что допустимое выступание закладных головок (0,05 мм) после клепки может быть реализовано путем их механической зачистки (фрезерованием), поскольку объем выступающей перед клепкой части закладной головки (объем компенсатора) значительно превышает величину, необходимую для заполнения зазоров на участке зенкованного гнезда и для создания радиального натяга в соединении по толщине пакета.

В процессе зачистки удаляется защитное антикоррозионное покрытие с закладных головок заклепок и не исключается повреждение их и обшивки на примыкающих к закладным головкам участках из-за имеющей место утяжки последней, а также при применении для зачистки ручного механизированного инструмента. Это обстоятельство потребовало разработки новых заклепок и технологии их поставки.

Одним из путей повышения усталостных характеристик сборных авиационных конструкций является создание прогрессивных крепежных элементов, технологии их установки, условий, обеспечивающих характеристики долговечности герметичности и качества внешней поверхности. Одним из таких крепежных элементов является заклепка с цилиндрическим компенсатором по ОСТ 134055-92, разработанная специалистами ХАИ, АНТК им. О.К. Антонова и НПО "Нормаль".

Проведенные ранее исследования [1, 2] характеристик НДС элементов заклепочных соединений не учитывали влияние технологических отклонений геометрических размеров отверстий и заклепок на характеристики НДС элементов соединения. Не рассматривалось также контактное взаимодействие между элементами заклепочного соединения, НДС элементов соединения после фрезерования закладных головок.

Целью данной статьи является разработка методики определения влияния корончатого и цилиндрического типов компенсаторов на характеристики локального НДС элементов соединений и их податливости с учетом физической и геометрической нелинейности характеристик элементов соединения, а также их контактного взаимодействия и истории деформирования.

В качестве исходных рассматриваются геометрические характеристики соединяемых элементов, действующие в них расчетные нагрузки, типы применяемых крепежных элементов.

Методика определения характеристик локального НДС и податливости элементов срезного соединения включает в себя:

1. Выделение из модели распределения пространства агрегата самолета зоны исследуемого заклепочного соединения и его границ. Определение характеристик общего НДС соединения.

2. Выбор параметров, влияние на характеристики локального НДС которых необходимо исследовать. Задание диапазонов изменения выбранных параметров.

3. Создание трехмерной модели элементов соединения. Разработка расчетной схемы. Создание конечно-элементной модели, включающей в себя контактные элементы, моделирование процесса выполнения и работы соединений при нагружении с учетом контактного взаимодействия элементов.

4. Установление характера взаимодействия соединяемых элементов и расчет распределения нагрузок между ними:

- а) определение стягивающих усилий в теле заклепки;

- б) выявление характера распределения контактных давлений и натягов между стенками отверстия и заклепкой;

- в) рассмотрение контактного взаимодействия соединяемых пластин. Определение зон действия максимальных контактных давлений;

5. Определение характера распределения эквивалентных напряжений в соединяемых элементах. Выявление зон возможного усталостного разрушения и определение в них отнулевых эквивалентных напряжений и деформаций, а также произведения этих величин.

6. Построение зависимостей "нагрузка – смещение" и определение податливости соединений с рассматриваемыми типами компенсаторов.

7. Анализ полученных результатов и разработка методов улучшения качества рассматриваемых соединений.

Предложенная методика апробирована при исследовании характеристик локального НДС и податливости однорядных соединений заклепками ОСТ 1 34052-85 и ОСТ 1 34055-92. Образцы соединений соответствуют заклепочным соединениям стрингеров с обшивкой сборной панели крыла (рис. 2).

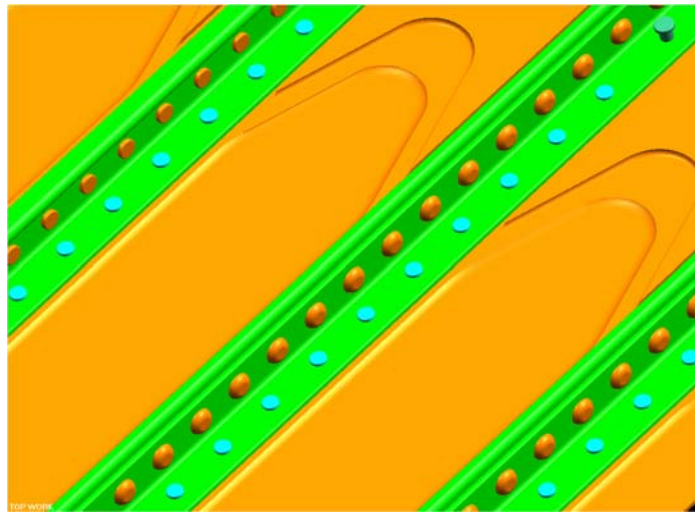


Рис. 2. Фрагмент конструкции сборной панели крыла

Моделирование заклёпок осуществляется путём вращения генерирующего контура вокруг оси заклёпки. Контур заклёпки строится по чертежу (рис. 3).

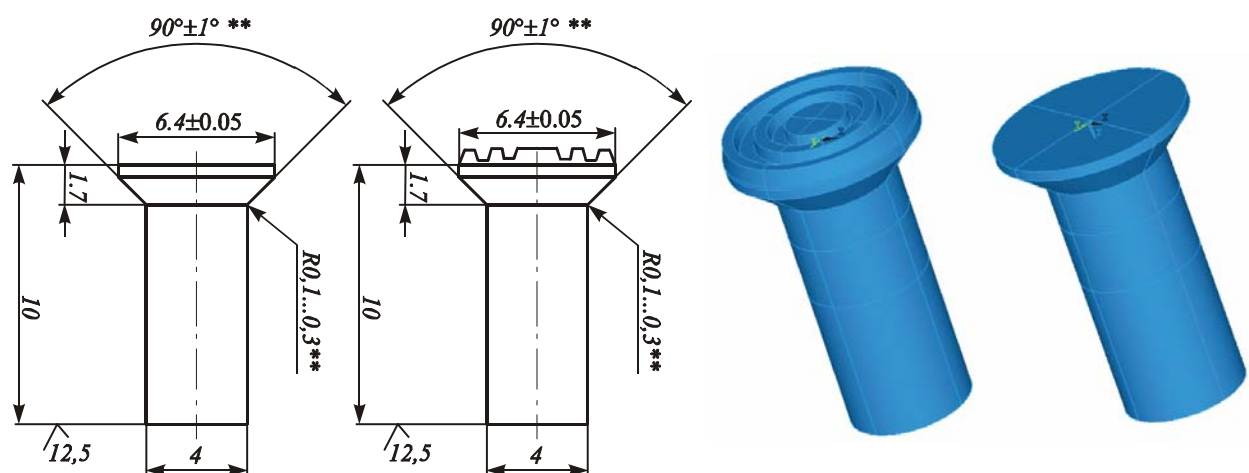


Рис. 3. Заклёпки с потайной закладной головкой по ОСТ 1 34055-92 и ОСТ 1 34052-85

Модели соединяемых пластин с толщинами, соответствующими толщинам стрингера $\delta_{стр}=2$ мм и обшивки $\delta_{обш}=3$ мм, имеют зенкованные отверстия, выполненные с цилиндрическим пояском (рис. 4).

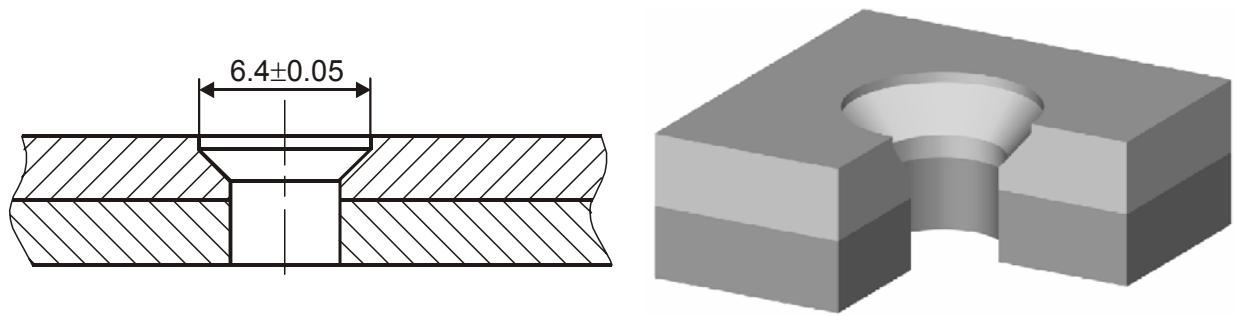


Рис. 4. Гнездо под заклёпки по ОСТ 1 34055-92 и ОСТ 1 34052-85

Рассмотрено соединение пластин заклепкой $\varnothing 4$ мм. При указанных допусках на изготовление заклепок и гнезд под их установки возможная разница диаметров компенсатора и цилиндрической части отверстия составляет 0,1 мм. Для заклепок по ОСТ 1 34055-92 исследовалась степень влияния гарантированного натяга при разнице диаметров компенсатора и цилиндрического пояса зенкованного отверстия $D_{\text{комп}} - D_{\text{отв}} = 0, 0,05$ и 0,1 мм (рис. 5).

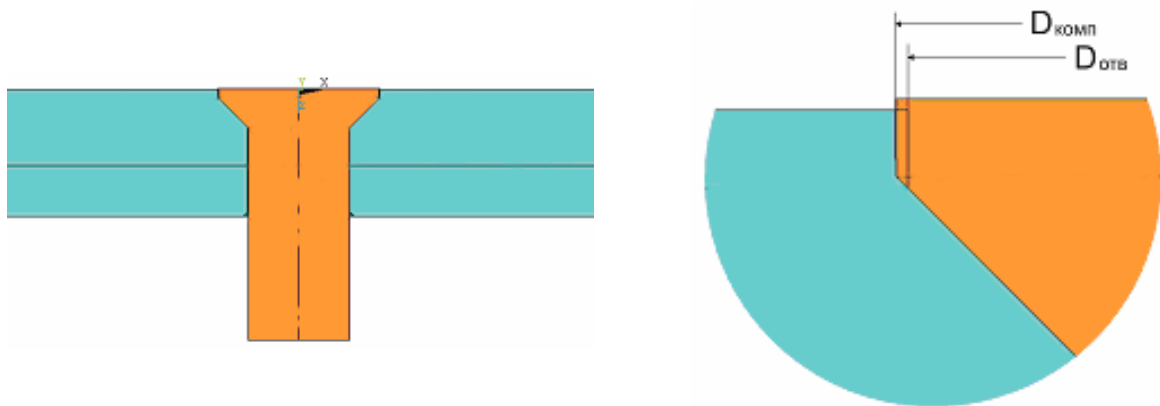


Рис. 5. Постановка заклепки по ОСТ 1 34055-92 с гарантированным натягом по цилиндрической части отверстия

Расчетная схема однорядного односрезного заклепочного соединения представлена на рис. 6.

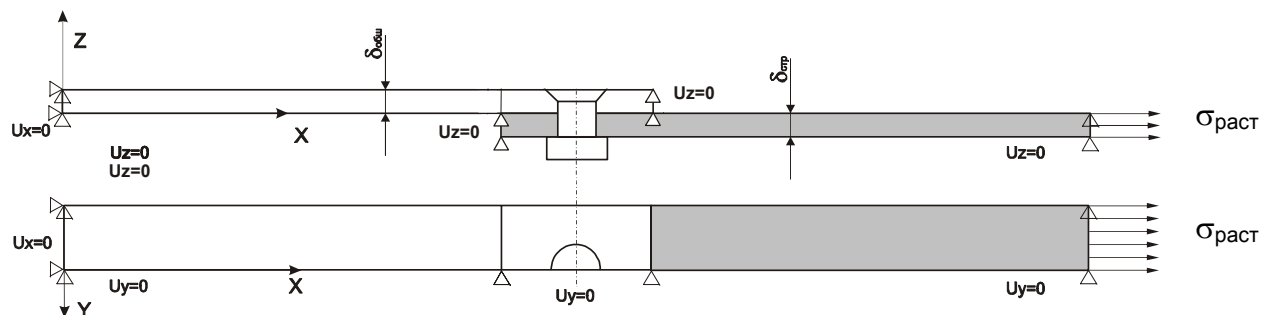


Рис. 6. Расчетная схема односрезного однорядного заклепочного соединения

Ввиду симметрии образцов рассматривалась 1/2 часть моделей с соответствующими условиями закрепления. Все узлы, лежащие в плоскости симметрии модели, имеют ограничения в перемещении по оси Y . Для закрепления образца

в направлении Z выбраны узлы, лежащие на торцевых поверхностях. Все торцевые узлы модели верхней пластины закреплены в направлении X-й компоненты.

Вследствие эксцентриситета передачи нагрузки возможна деформация однорядного соединения в виде поворота, что отразится на точности измерения перемещений соединяемых пластин в абсолютной системе координат XYZ. В работе многорядного заклепочного соединения обшивки со стрингером такой поворот исключен. Для предотвращения поворота модели однорядного заклепочного соединения выполнялось закрепление всех узлов, лежащих в плоскостях свободных торцов, путем недопущения вертикальных перемещений UZ. Ограничения накладывались после моделирования процесса клепки перед приложением растягивающей нагрузки $\sigma_{\text{раст}}$.

Конечно-элементная модель соединения (рис. 7) выполнена из объемных восьмиузловых элементов SOLID45 и контактных элементов второго порядка CONTA173, TARGE170, представленных в базе данных ANSYS [3].

Модель заклепки с корончатым компенсатором состоит из двух составляющих: фрезеруемой части закладной головки и непосредственно самой заклепки. Процесс фрезерования после клепки выступающей части закладной головки моделировался путем деактивирования элементов, соответствующих фрезеруемой части заклепки. Граница раздела этих двух тел выбиралась таким образом, чтобы выступание закладной головки заклепки после моделирования фрезерования не превышало 0,05 мм от поверхности соединяемой пластины. В модели заклепки по ОСТ 134055-92 корончатый компенсатор отсутствует.

Для удобства представления графических результатов приняты следующие обозначения:

- 1 – соединение заклепкой по ОСТ 1 34052-85;
- 2 – соединение заклепкой по ОСТ 1 34055-92 с посадкой без зазора и натяга между компенсатором заклепки и зенкованным отверстием;
- 3 – соединение заклепкой по ОСТ 1 34055-92 с разницей диаметров цилиндрического компенсатора и зенкованного отверстия $\Delta=0,05$ мм;
- 4 – соединение заклепкой по ОСТ 1 34055-92 с разницей диаметров $\Delta=0,1$ мм.



Рис. 7. Конечно-элементная модель однорядного заклепочного соединения

В процессе решения конечно-элементной задачи получено поле распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ в элементах рассматриваемых соединений после процесса клепки и величины контактных давлений между заклепкой и стенками отверстия в пластинах (рис. 8, 9).

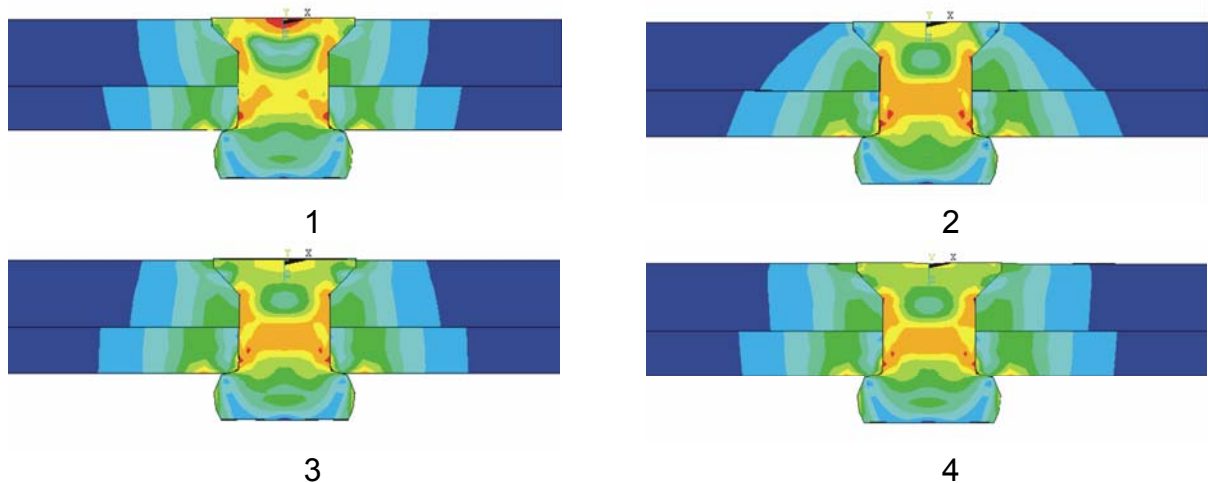


Рис. 8. Характер распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ в элементах однорядных заклепочных соединений после моделирования процессов клепки

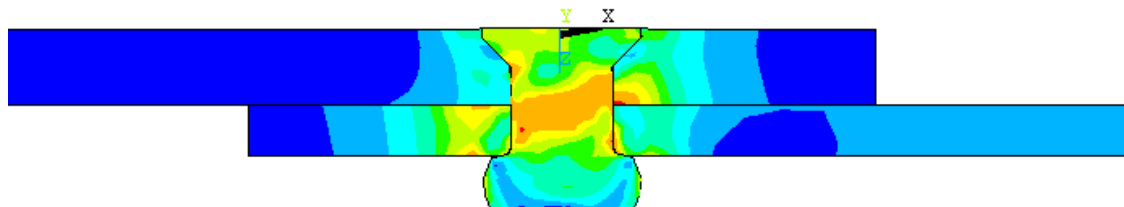


Рис. 9. Характер распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ в элементах однорядных заклепочных соединений при растяжении

Как видно из рис. 8, равномерное поле эквивалентных напряжений достигается при использовании заклепки с корончатым компенсатором (ОСТ 1 34052-85) и при постановке заклепки по ОСТ 1 34055-92 с разницей диаметров цилиндрического пояса и зенкованного отверстия $\Delta=0,1$ мм.

Для определения стягивающих усилий были определены напряжения σ_z , действующие в стержне заклепки в направлении, указанном на рис. 10, 11.

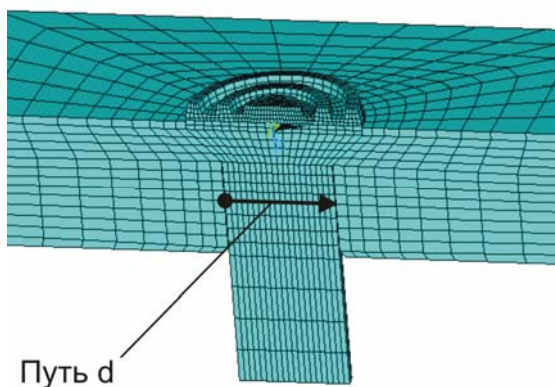


Рис. 10. Путь d, по которому отображаются напряжения σ_z

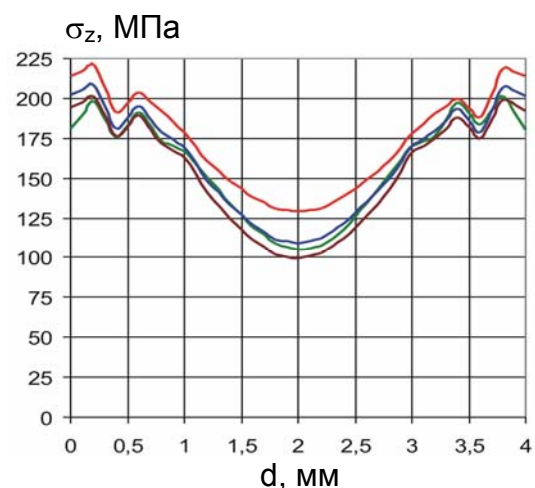


Рис. 11. Растягивающие напряжения σ_z в теле заклепки по пути d после моделирования процесса клепки

Как видно из рис. 11, напряжения в цилиндрической части тела заклепки имеют осесимметричный характер. Для определения усилия в стержне заклепки после клепки поле напряжений в цилиндрической части тела заклепки представлено в виде кольцевых зон, в которых напряжения принимались постоянными. Формула для определения в стержне заклепки следующая:

$$P = \frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^{N-1} (R_{i-1}^2 - R_i^2) (\sigma_{i-1} + \sigma_i),$$

где N – число кольцевых зон, на которые разбито сечение заклепки;

i – номер кольцевой зоны ($i=1 \dots N$);

R_{i-1}^2, R_i^2 – внутренний и внешний радиусы кольцевой зоны;

σ_{i-1}, σ_i – напряжения на границах кольцевой зоны;

Усилия в стержне заклепки для различных вариантов представлены в таблице.

Вариант	1	2	3	4
$P, Н$	2171	2394	2247	2162
% от $P_{разр}=5526Н$	39	43	40	39

Рассмотрен характер контактного взаимодействия между заклепкой и стенками отверстия и между соединяемыми пластинами (рис. 12).

Установлено, что контактные давления $\sigma_{\text{конт}}$ между заклепкой и цилиндрическим пояском зенкованного отверстия в пластине в варианте 4 достигают 380 МПа, что на 270 МПа больше величины контактных давлений в варианте постановки заклепки с одинаковыми диаметрами закладной головки и отверстия под нее (2) и на 200 МПа больше, чем при постановке заклепки с корончатым компенсатором (1). Установлено также, что величина контактного давления между заклепкой и стенками отверстия в верхней и нижней пластинах находится на уровне 380...400 МПа (вариант 4).

Рассмотрено контактное взаимодействие соединяемых пластин. На рис. 13 приведен характер распределения контактных давлений $\sigma_{\text{конт}}$ между верхней и нижней пластинами.

Как видно из рис. 13, зона максимальных контактных давлений между соединяемыми пластинами расположена на кромке отверстия. В соединении заклепкой с корончатым компенсатором максимальные контактные давления больше на 25...30 МПа по сравнению с вариантом соединения заклепкой по ОСТ 134055-92.

Исследован характер распределения эквивалентных напряжений в пластине с зенкованным отверстием после клепки при внешнем растягивающем нагружении (рис. 14).

В качестве критических рассмотрены кромки перехода цилиндрического пояса в зенкованную часть отверстия в поперечном сечении пластины (рис. 15).

Для определения долговечности заклепочных соединений важна оценка НДС в критических зонах путем приведения действующих в них напряжений к отнулевому циклу по формуле Одингга:

$$\sigma_0 = \sqrt{2\sigma_a \sigma_{\text{max}}} , \quad (1)$$

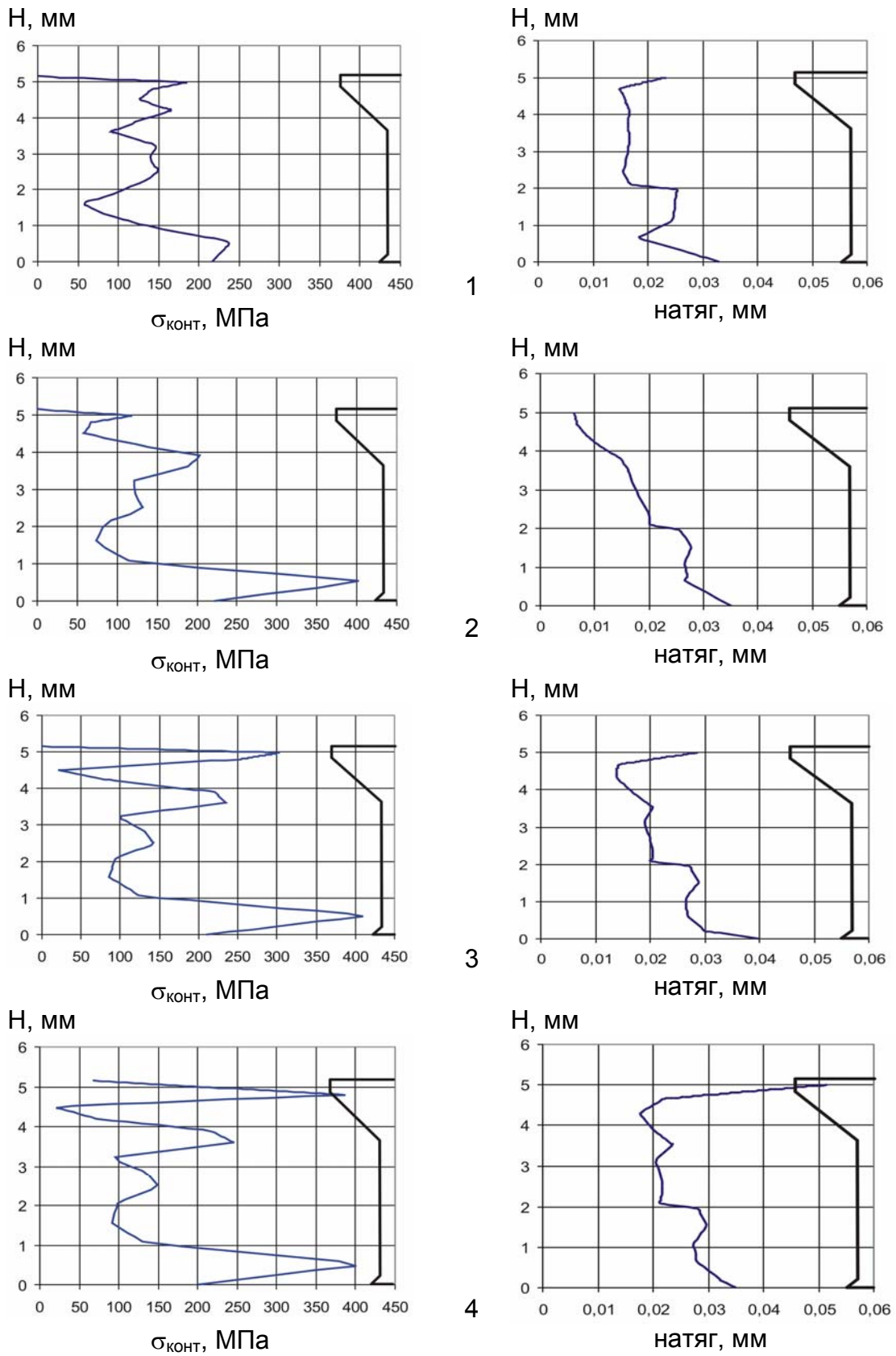


Рис. 12. Характер распределение контактных давлений $\sigma_{\text{конт}}$ и натягов между заклепкой и стенками отверстий по толщине соединяемого пакета H после моделирования процесса клепки и фрезерования

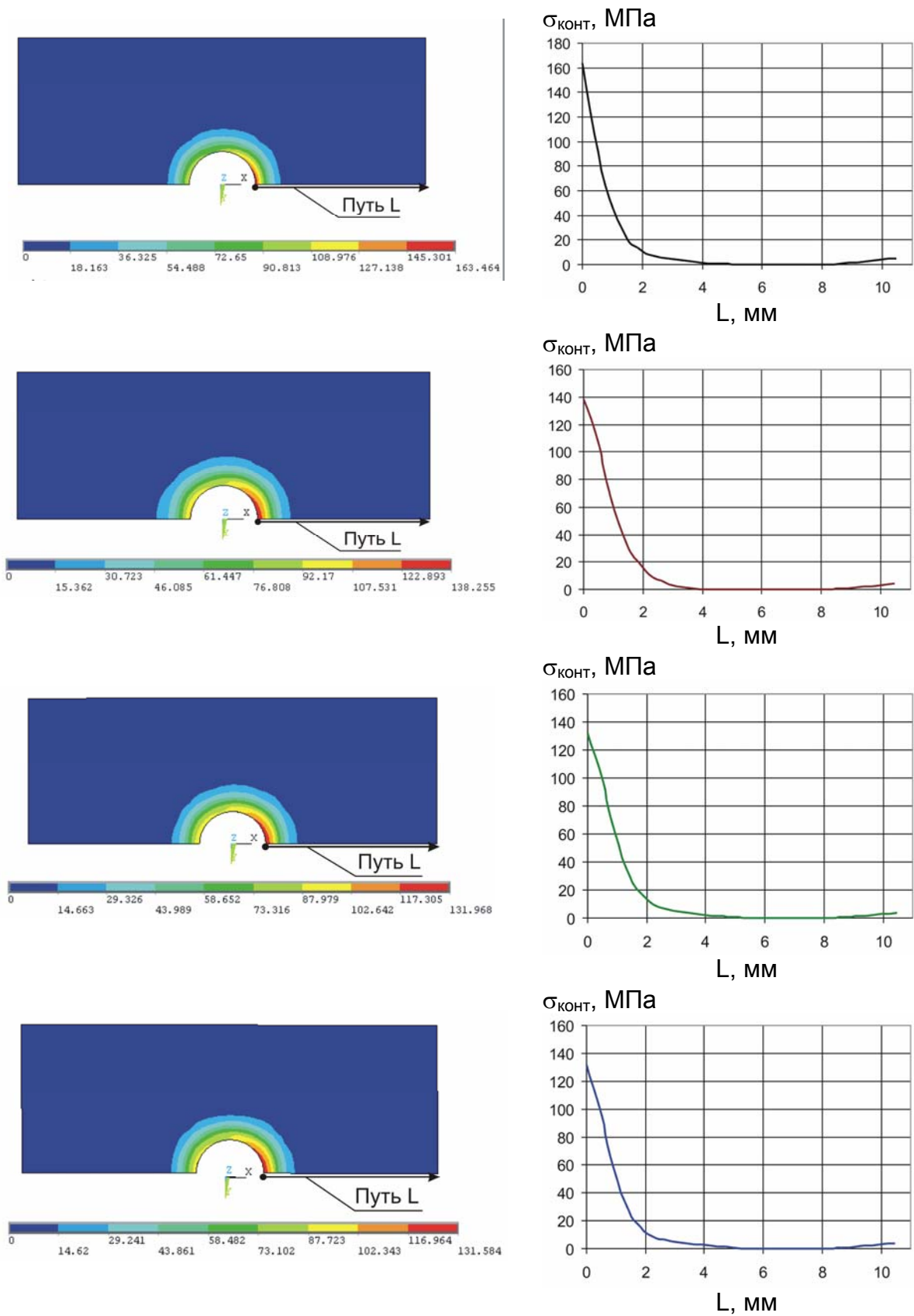


Рис. 13. Характер распределения и величина контактных давлений между пластинами при внешнем растягивающем нагружении $P_{\text{раст}} = 1800 \text{ Н}$ ($\sigma_{\text{раст}} = 50 \text{ МПа}$)

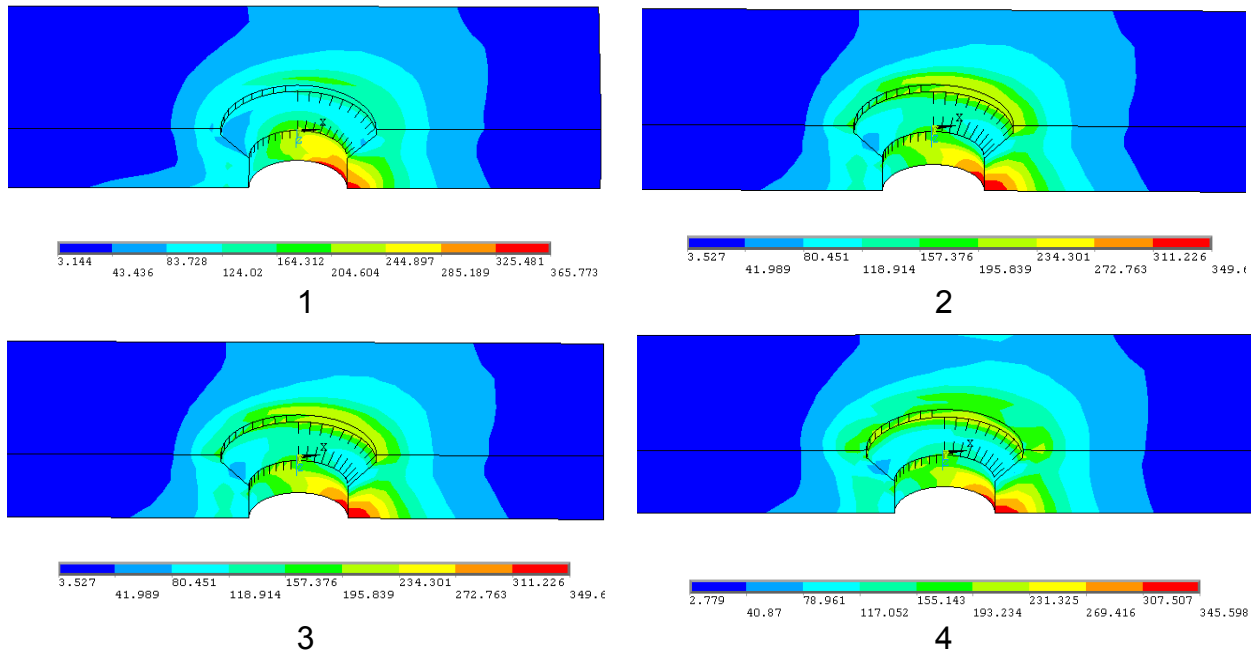


Рис. 14. Характер распределения эквивалентных напряжений σ_{eqv} в верхней пластине при различных вариантах установки заклепки и уровне внешнего нагружения $\sigma_{\text{раст}} = 50$ МПа

Из рис. 15 видно, что эквивалентные напряжения, приведенные к отнулевому циклу, действующие в рассмотренной зоне, достигают величины 35...100 МПа при $\sigma_{\text{раст}} = 50$ МПа. Постановка заклепки по ОСТ 1 34055-92 с диаметром компенсатора, большим на 0,1 мм диаметра отверстия, снижает величину $\sigma_{\text{eqv}0}$ практически в 2 раза по сравнению с постановкой "в номинал" (вариант 2) и в 3 раза по сравнению с вариантом соединения заклепкой с корончатый компенсатором (вариант 1).

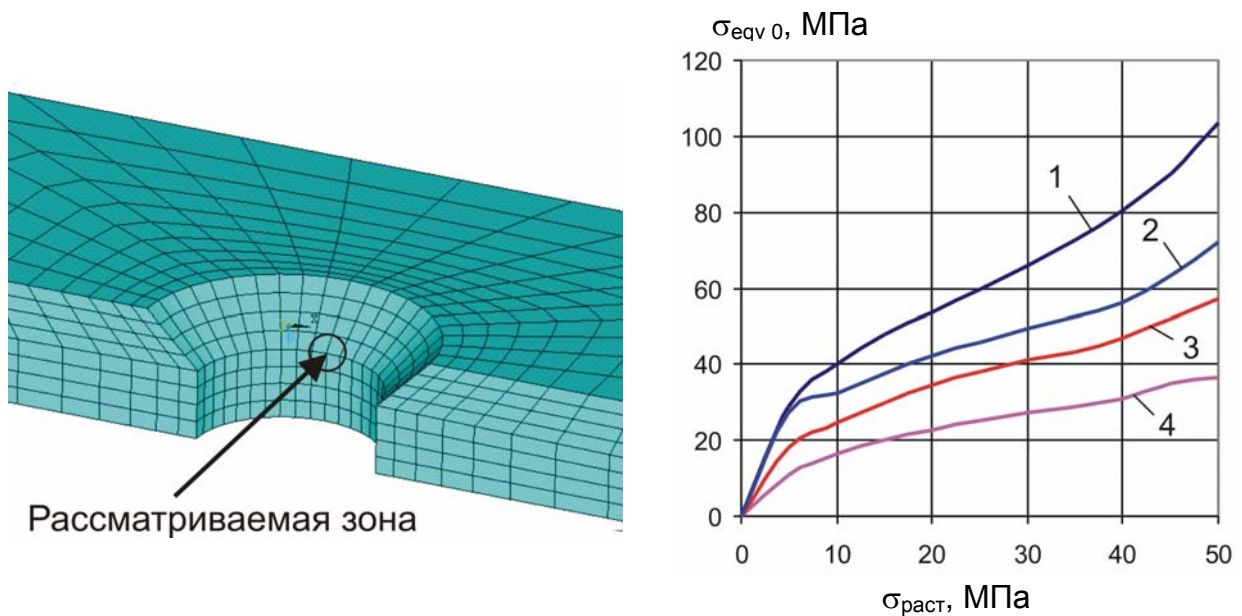


Рис. 15. Влияние уровня нагружения $\sigma_{\text{раст}}$ и типа заклепки на величину эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{eqv}0}$ в рассматриваемой зоне

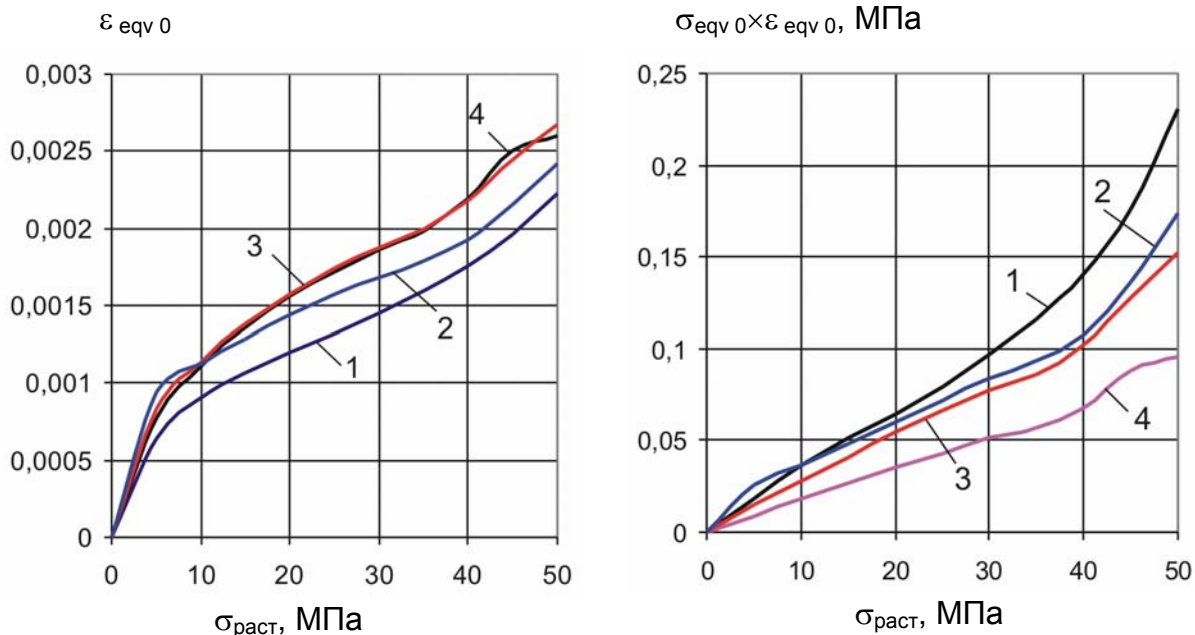


Рис. 16. Влияние уровня нагружения $\sigma_{\text{раст}}$ и типа заклепки на величину эквивалентных деформаций $\varepsilon_{\text{eqv } 0}$ и произведения $\sigma_{\text{eqv } 0} \times \varepsilon_{\text{eqv } 0}$

На рис. 17, 18 приведены зависимости "нагрузка – смещение" и зависимости податливости для рассматриваемых соединений. Замеры проводились по свободным торцам [4].

Как видно из рис. 18 податливость рассмотренных соединений отличается незначительно и лишь при внешней растягивающей нагрузке более 1200 Н значение податливости соединения заклепкой с корончатым компенсатором меньше 15% по сравнению с вариантами соединений по ОСТ 1 34055-92.

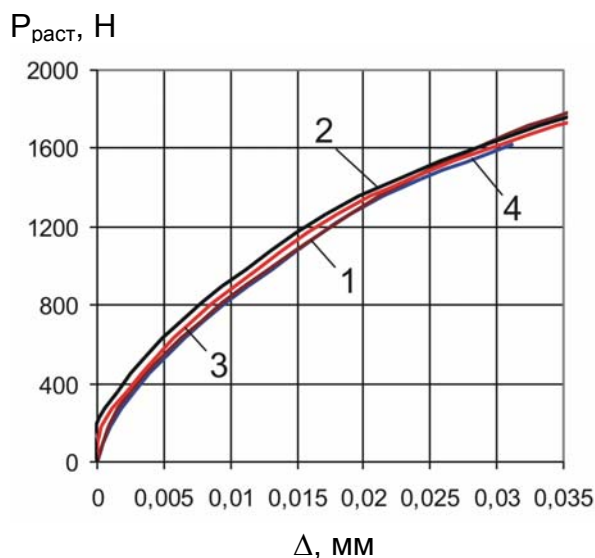


Рис. 17. Зависимость "нагрузка-смещение" для образцов заклепочных соединений

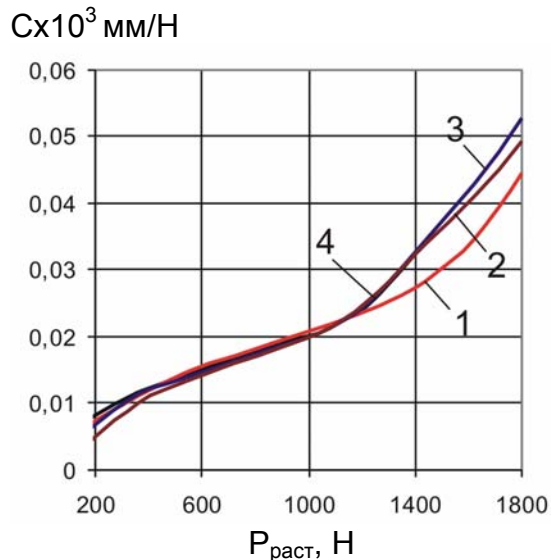


Рис. 18. Зависимость податливости рассмотренных образцов от приложенной растягивающей нагрузки

Выводы

1. Разработана методика определения характеристик локального НДС и податливости элементов в срезном заклепочном соединении с корончатым и цилиндрическим компенсатором с помощью системы инженерного анализа CAD/CAE ANSYS, включающая в себя определение стягивающих усилий в теле заклепки, выявление характера распределения контактных давлений и натягов между стенками отверстия и заклепкой, рассмотрение контактного взаимодействия соединяемых пластин, определение зон действия максимальных контактных давлений, определение характера распределения эквивалентных напряжений в соединяемых элементах, выявление зон возможного усталостного разрушения и определение в них отнулевых эквивалентных напряжений и деформаций, а также произведения этих величин, построение зависимостей "нагрузка – смещение" и определение податливости соединений с рассматриваемыми типами компенсаторов.

2. Установлено, что соединение заклепкой по ОСТ 1 34055-92 имеет меньшую величину произведения $\sigma_{\text{eqv}} \times \varepsilon_{\text{eqv}}$, при чем с увеличением натяга по цилиндрической части отверстия величина произведения уменьшается в 2...2,5 раза.

3. Установлено, что при постановке заклепки с цилиндрическим компенсатором целесообразно обеспечить дополнительный натяг между цилиндрическим пояском зенкованного отверстия и заклепкой путем выполнения диаметра цилиндрического пояса зенкованного отверстия на 0,1 мм меньше диаметра цилиндрического компенсатора заклепки.

Список литературы

1. Лебединский А.Г. Исследование усталостной прочности потайных заклепочных соединений повышенного ресурса: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.07.03 / Харьк. авиац. ин-т. – Х., 1975. 30 с.
2. Семенов Л.П. Исследование и определение конструктивно-технологических параметров клепки и внедрение технологических процессов, обеспечивающих рациональное значение радиального натяга в заклепочных соединениях авиаконструкций. Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.07.04 / Харьк. авиац. ин-т. – Х., 1993. 20 с.
3. ANSYS Element Guide. Chapter 3. Element References. Section 3.1. Element library. 001087. 4th Edition. SAS IP[©].
4. Гребеников А.Г., Дубров И.Н. Методика расчета распределения усилий между рядами в срезных болтовых соединениях авиационных конструкций с помощью системы инженерного анализа ANSYS // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2003. – Вып. 17 – С. 31-41.