

## Исследование влияния угла конусности пояска зенкованного гнезда отверстия в заклепочном соединении на распределение радиального натяга по толщине пакета

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

Представлены результаты исследования влияния угла конусности пояска зенкованного гнезда отверстия на распределение радиального натяга по толщине пакета. Расчетным путем установлено, что натяг при клепке распределяется неравномерно по толщине. Увеличение угла конусности пояска зенкованного гнезда отверстия под закладную головку приводит к снижению величины натяга в этой зоне. Для обеспечения герметичности соединения угол конуса гнезда отверстия в верхней пластине должен быть не более 5 град.

**Ключевые слова:** заклепка, радиальный натяг, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, пластичность.

Заклепочные соединения являются одним из наиболее распространенных видов неразъемных соединений, применяемых в авиации для соединения тонких листов и фасонных деталей.

Проектирование высокоресурсных и герметичных заклепочных соединений требует разработки конструкции заклепки и выбора геометрических параметров отверстия соединения. В работе [1] исследовано влияние высоты и угла конусности пояска модифицированного зенкованного отверстия на характеристики локального НДС пластины из материала Д-16АТ с гнездом под установку прогрессивной потайной заклепки АНУ0348.

Целью работы является численное исследование влияния формы гнезда под закладную головку на распределение натяга по толщине соединяемого пакета. В качестве объекта исследования рассмотрена модель заклепочного соединения двух листов, выполненного с применением заклепки АНУ 0348. Геометрические параметры модели показаны на рис. 1.

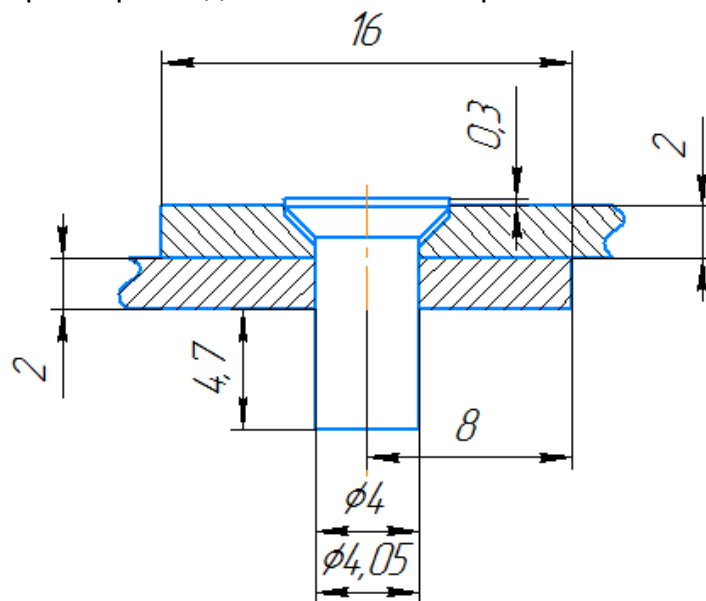


Рис. 1. Образец заклепочного соединения

Формы и размеры гнезда под закладную головку показаны на рис. 2, геометрия и размеры заклепки АНУ 0348 – на рис. 3. Материал пластин – алюминиевый сплав 1163Т, материал заклепки – алюминиевый сплав В65 [2].

В качестве варьируемого параметра в данном исследовании принят угол конусности зенкованного отверстия. Исследования проведены для следующих значений угла конуса – 0, 5, 10 и 15°.

Моделирование процесса клепки с использованием лагранжева метода конечных элементов выполнено в системе инженерного анализа ANSYS. Учитывая геометрическую симметрию, моделировали половину соединения с заданием соответствующих граничных условий по плоскости симметрии. Для аппроксимации расчетных моделей пластин и заклепки выбраны восьмиузловые элементы твердого деформируемого тела [3], обладающие тремя степенями свободы в каждом из узлов (линейные перемещения вдоль осей X, Y, Z). Верхний и нижний штампы, используемые при клепке, моделировали как абсолютно жесткие тела. Контактное взаимодействие элементов заклепочного соединения и технологического инструмента описано общей моделью контакта типа «поверхность–поверхность» с применением кулоновской модели трения [4]. Значение коэффициентов сухого трения для контактной пары «заклепка-штамп» принято равным 0,65 [5]. Значение коэффициентов сухого трения между пластинами принято равным 0,94 [5]. Значение коэффициентов сухого трения между поверхностями закладной головки и гнезда принято равным 0,15 [5].

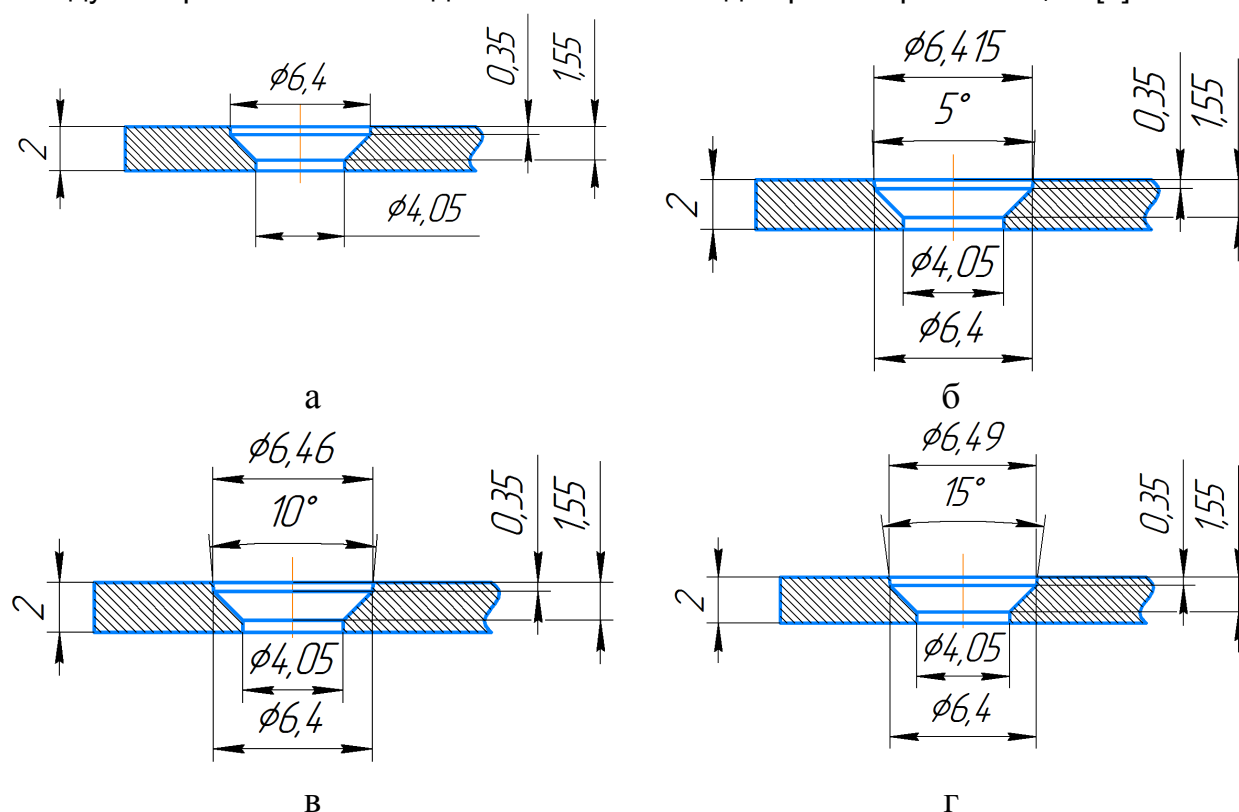


Рис. 2. Форма и размеры гнезда под закладную головку

Особенностью решаемой задачи является существенная геометрическая и физическая нелинейности поведения тела заклепки при клепке. Для описания нелинейного поведения материала заклепки и процессов возникновения и развития локальных пластических деформаций в зоне отверстия пластин при

клепке применена модель упругопластического поведения материала с изотропным упрочнением [6]. Истинные диаграммы деформирования материала заклепки и пластины показаны на рис. 4.

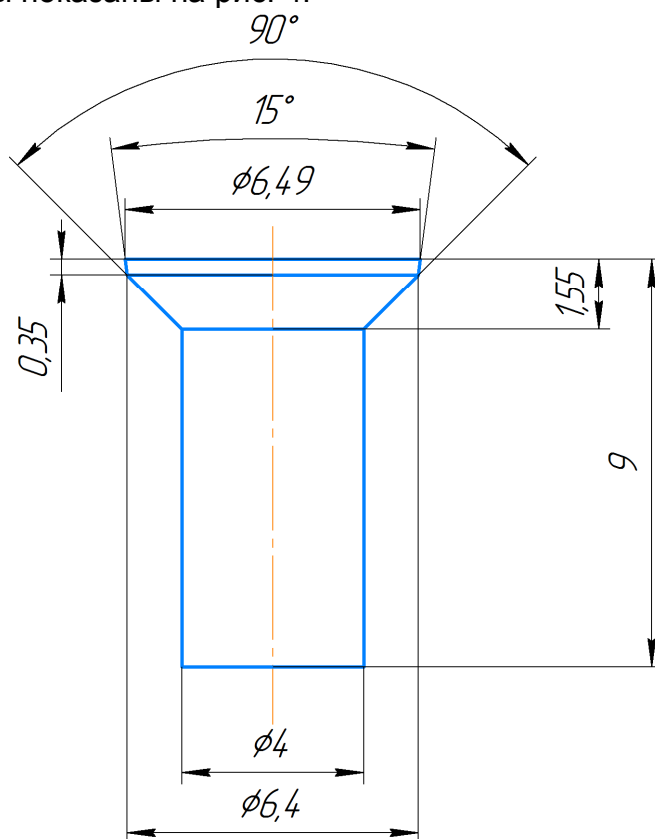


Рис. 3. Основные размеры заклепки АНУ 0348

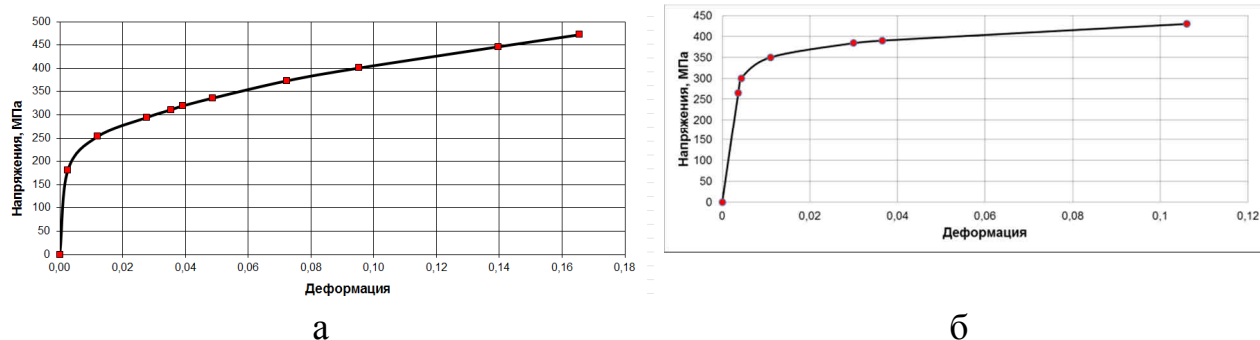


Рис. 4. Истинные диаграммы деформирования материалов В-65 (а) и 1163 (б)

На рис. 5 показаны фрагменты конечноэлементной модели соединения с различными формами гнезда под закладную головку: а – угол конуса  $0^\circ$ , б – угол конуса  $5^\circ$ , в – угол конуса  $10^\circ$  и г – угол конуса  $15^\circ$ .

Смоделирован процесс формирования замыкающей головки при клепке и изучены его особенности. На примере одного из образцов соединения проанализированы особенности процесса деформирования и определены параметры, характеризующие НДС элементов соединения.

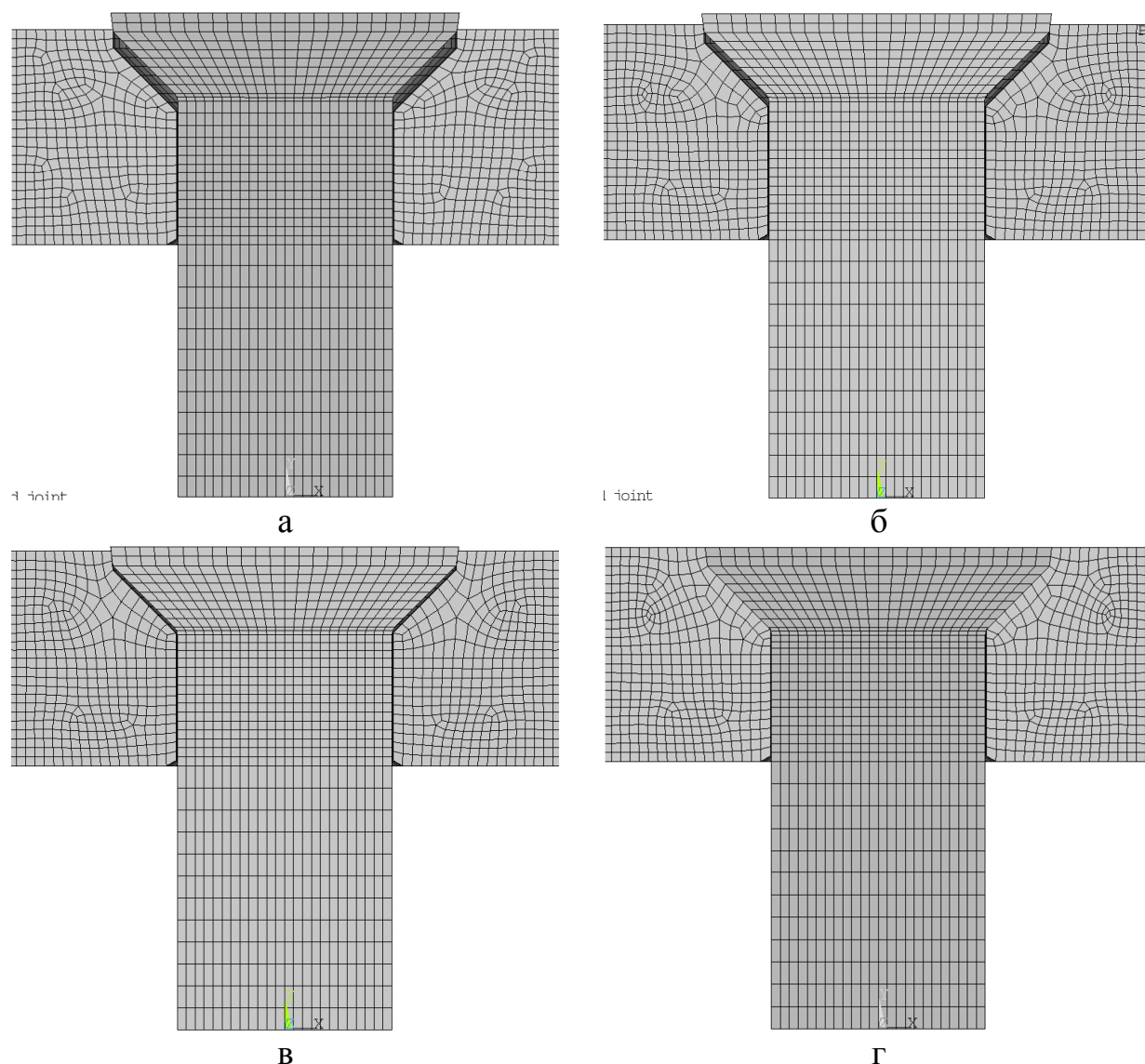


Рис. 5. Фрагменты конечноэлементных моделей заклепочного соединения

На рис. 6 показан результат моделирования при следующих значениях осадки: а – 0,874 мм, б – 1,826 мм, в – 2,528 мм, г – 3,1 мм. Форма гнезда под закладную головку – с углом конуса  $0^\circ$ .

Заклепка установлена в отверстие соединяемых деталей с зазором. На начальном этапе закладная головка выступает над поверхностью верхней пластины и неплотно садится в гнездо. По мере осадки стержня заклепки образуется бочка с ярко выраженным радиальным течением материала. При этом происходит радиальная раздача гнезда в верхней пластине и закладная головка постепенно садится в гнездо, контактируя с его соответствующими поверхностями. Кроме того, по мере формирования замыкающей головки уменьшается зазор между стержнем заклепки и стенкой отверстия. В результате контакта по соответствующим поверхностям возникает натяг по толщине пакета.

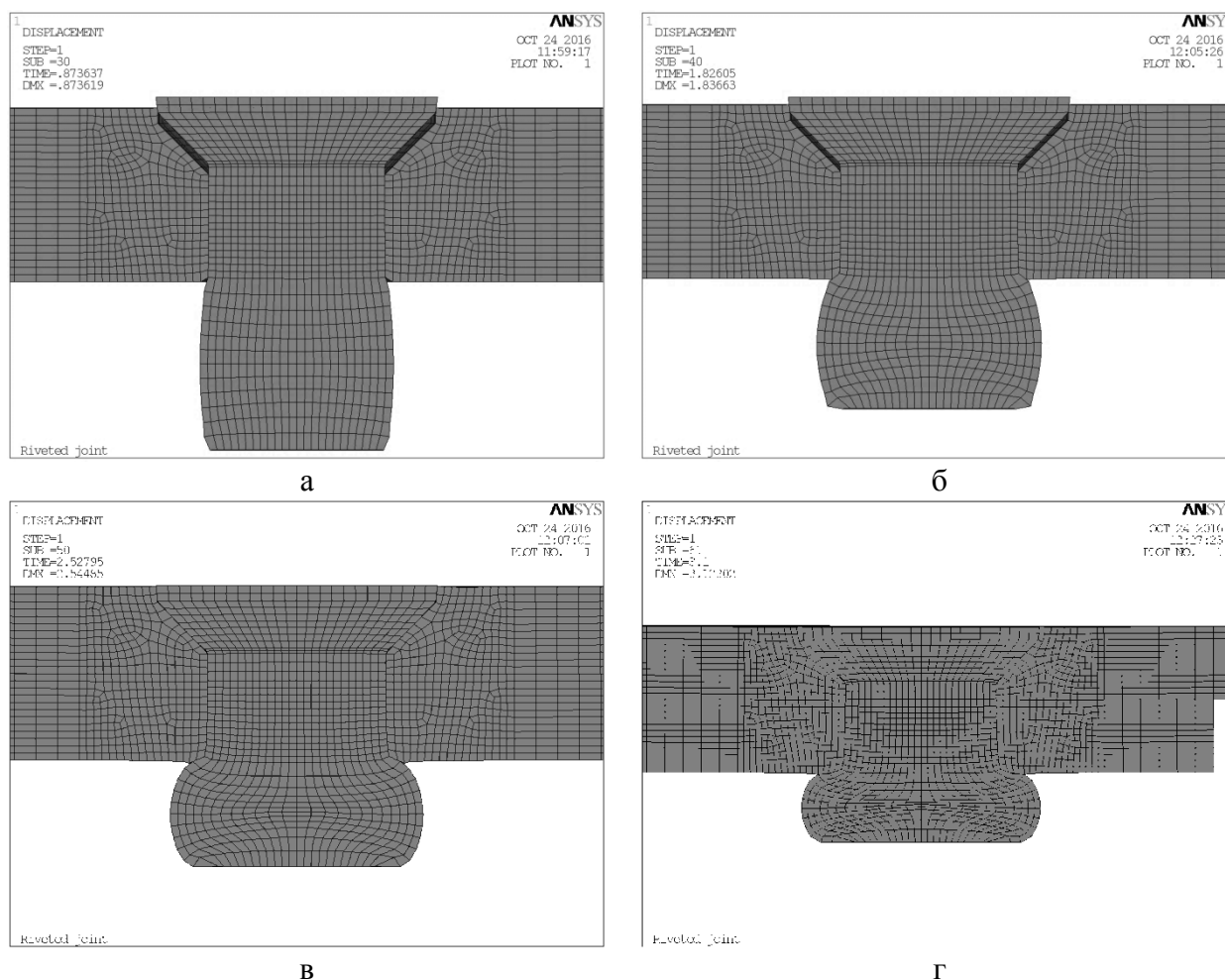


Рис. 6. Формирование замыкающей головки при клепке

На рис. 7 показано поле распределения эквивалентных пластических деформаций в элементах заклепочного соединения.

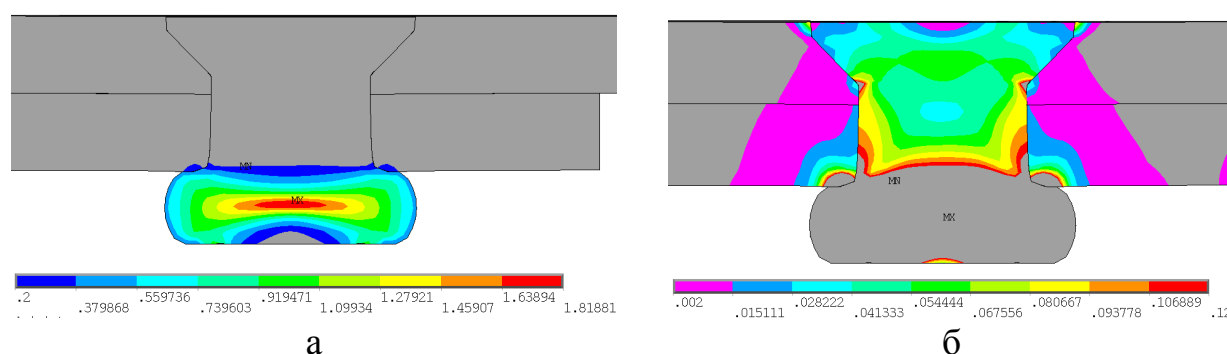


Рис. 7. Поле распределения эквивалентной пластической деформации EPPLEQV в заклепке и соединяемых пластинах

На рис. 7, а показано поле распределения эквивалентных пластических деформаций в замыкающей головке заклепки. Видно, что данное поле существенно неоднородно с максимальным значением пластической деформации 182%, достигаемым в центре замыкающей головки. На рис. 7, б показано поле распределения эквивалентных пластических деформаций в закладной головке и

стержне заклепки, а также в пластинах в зоне примыкающей к границе контакта заклепки с пластинами. Видно, что уровень пластических деформаций в данной зоне на порядок ниже, чем в замыкающей головке заклепки. Следует отметить неравномерность распределения деформаций по толщине. Максимальное значение пластической деформации в закладной головке не превышает 10%.

На рис. 8 показан характер распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в элементах заклепочного соединения.

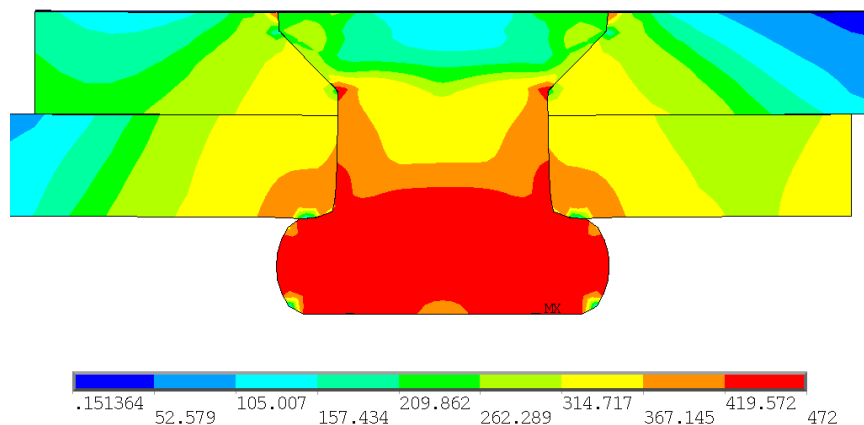


Рис. 8. Поле распределения эквивалентных напряжений по Мизесу SEQV в заклепке и соединяемых пластинах после клепки

Определены границы зоны пластичности как зоны, в которой эквивалентные напряжения по Мизесу превышают предел текучести материалов конструктивных элементов соединения (рис. 9). На рис. 9, б показана зона пластичности для нижней пластины, вид со стороны замыкающей головки, на рис. 9, в – зона пластичности для верхней пластины, вид со стороны закладной головки.

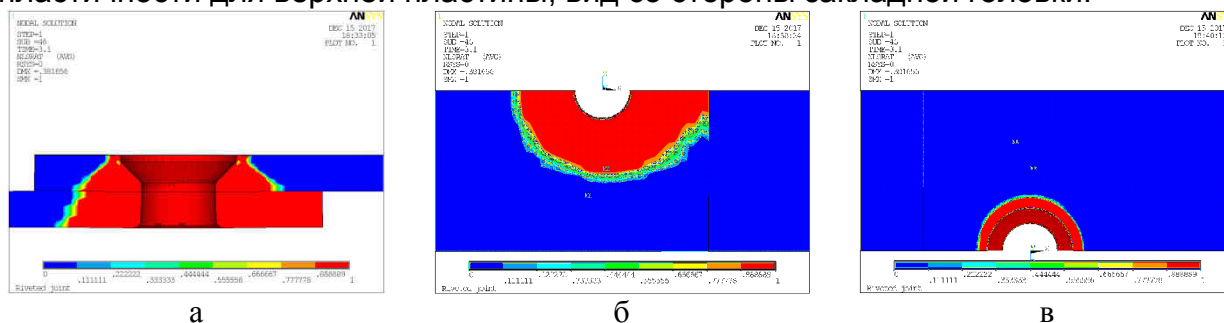


Рис. 9. Границы зоны пластичности в пластинах

Размеры зоны пластичности для нижней пластины больше, чем для верхней, что свидетельствует о большей степени пластических деформаций со стороны замыкающей головки.

Проанализирован характер распределения радиального натяга по толщине соединяемых пластин. Натяг определен в сечениях при следующих значениях углов, определяющих положение сечения: 0, 45, 90, 135 и 180° (см. рис. 10).

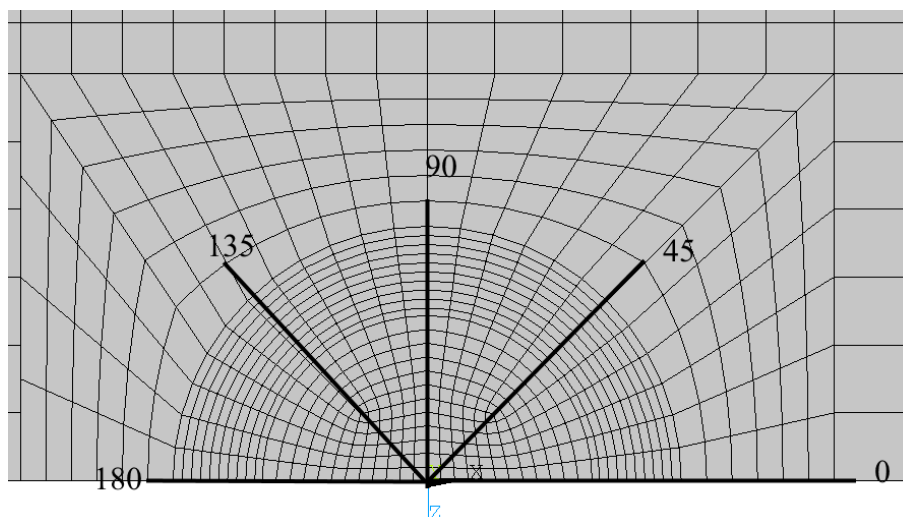


Рис. 10. Схема обозначения сечений, в которых определен натяг

Кривые распределения натяга получены без учета упругой разгрузки после отведения штампов, поэтому значения натягов выше, чем прогнозируемые после упругой разгрузки.

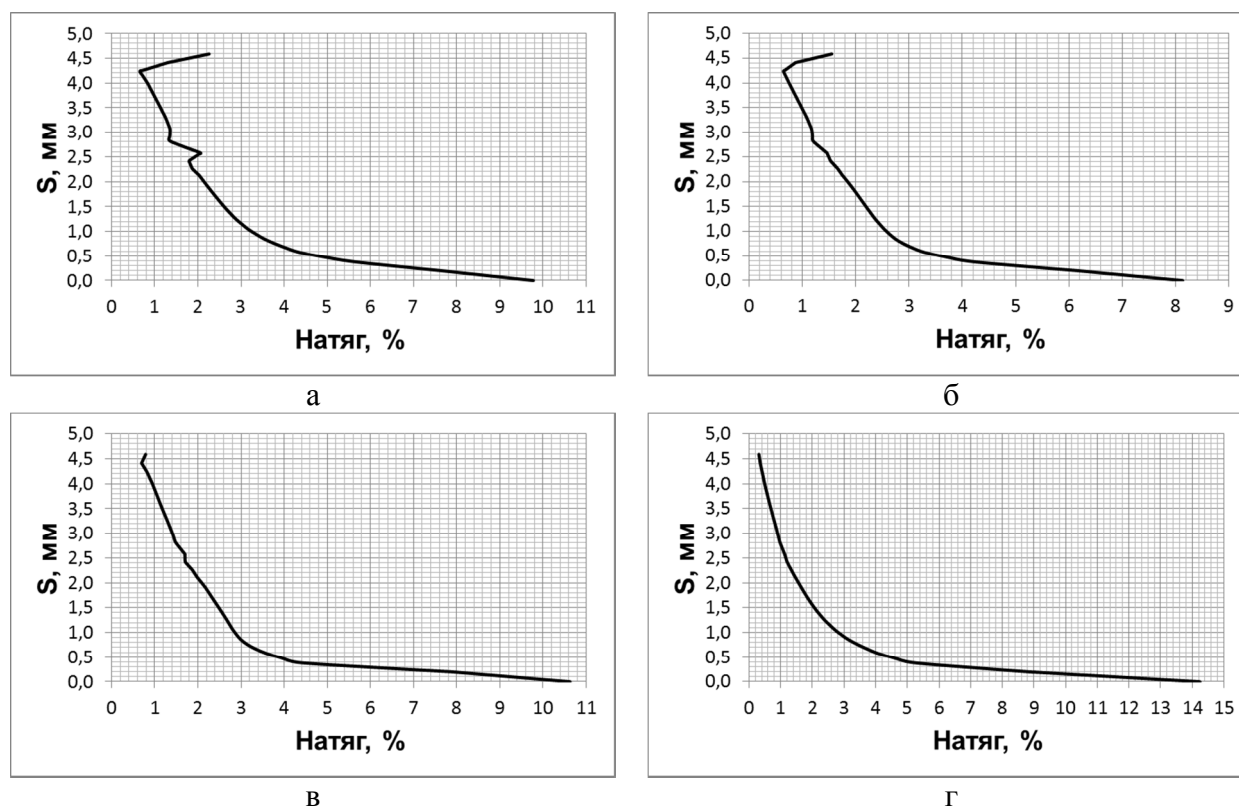


Рис. 11. Распределение натяга по толщине пакета в заклепочном соединении в сечении  $0^\circ$

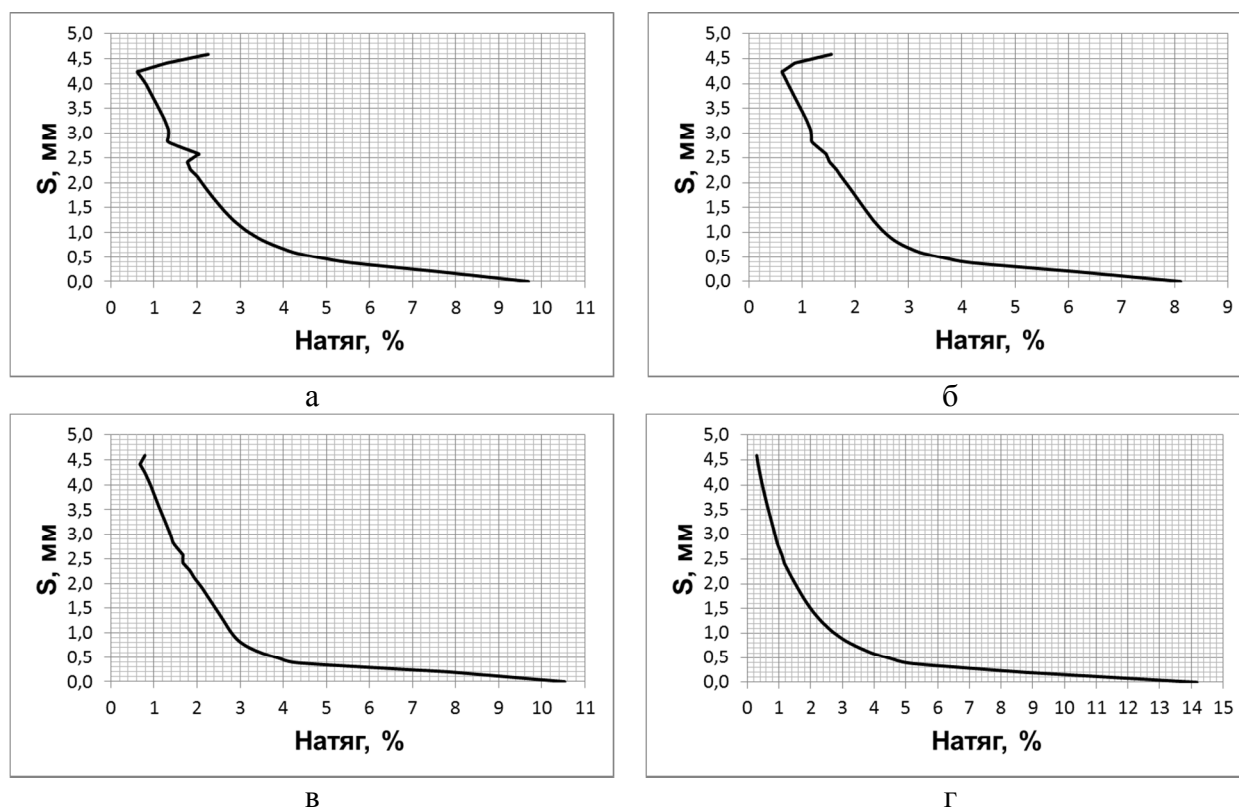


Рис. 12. Распределение натяга по толщине пакета в заклепочном соединении в сечении  $45^\circ$

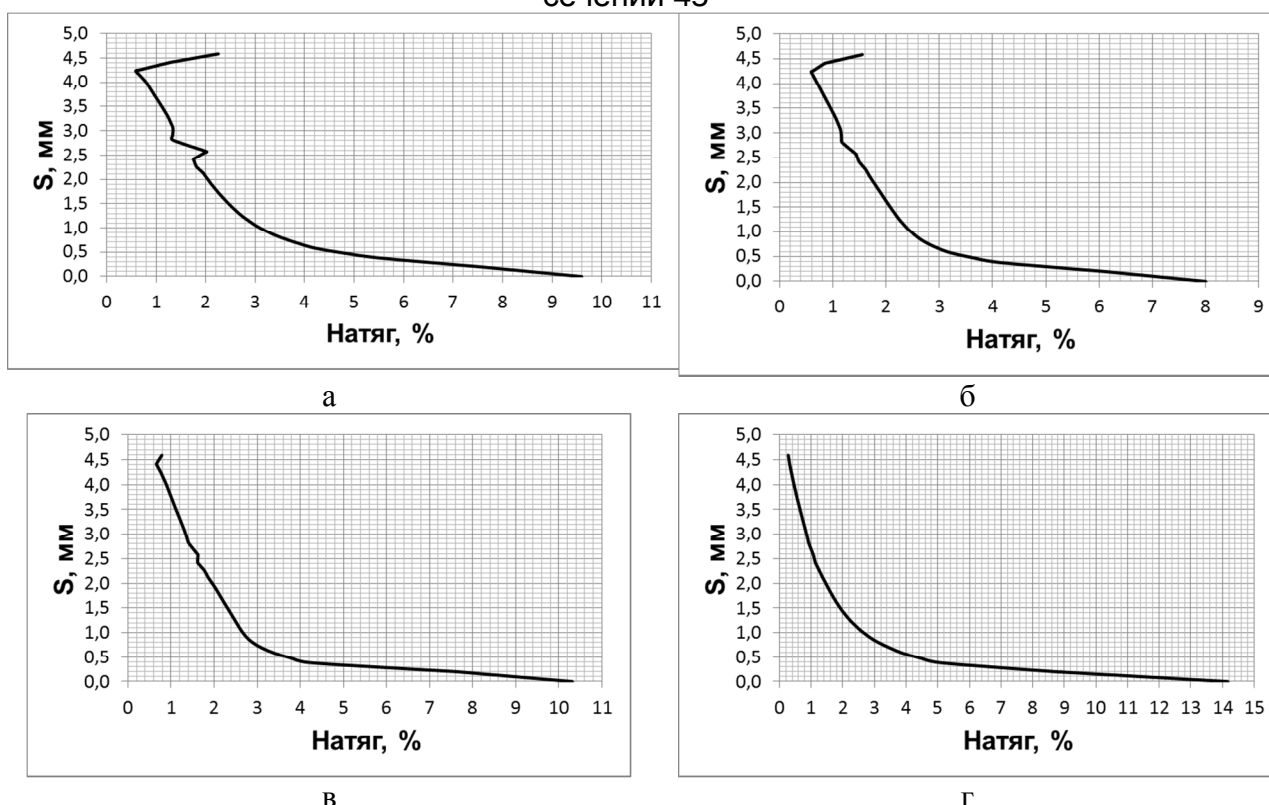


Рис. 13. Распределение натяга по толщине пакета в заклепочном соединении в сечении  $90^\circ$

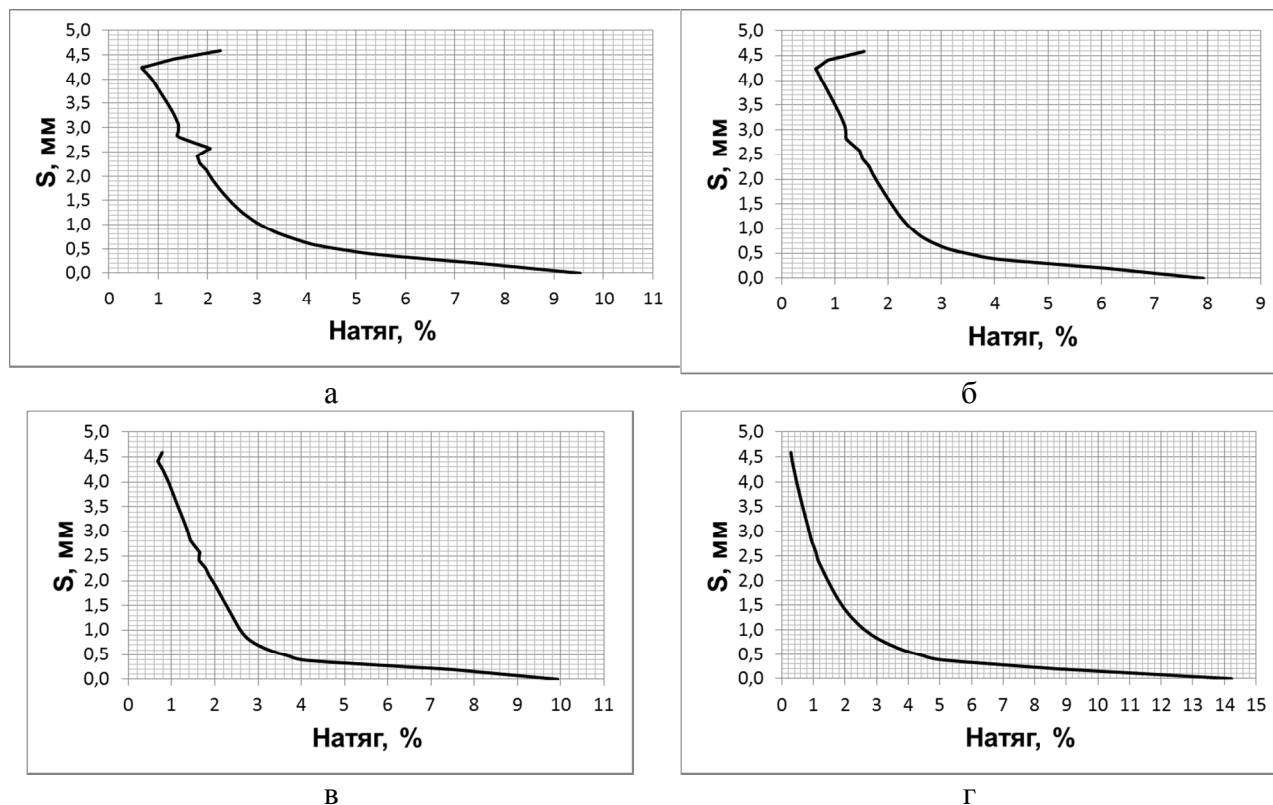


Рис. 14. Распределение натяга по толщине пакета в заклепочном соединении в сечении  $135^\circ$

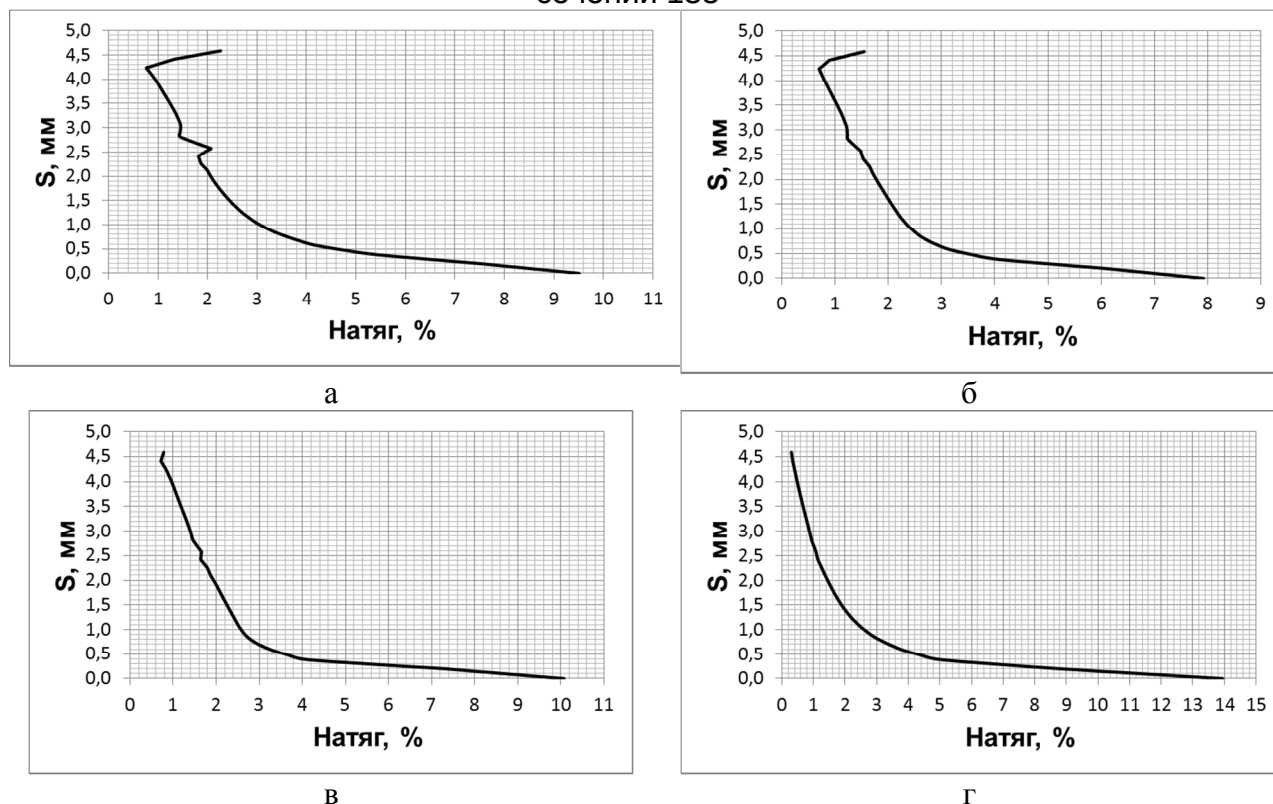


Рис. 15. Распределение натяга по толщине пакета в заклепочном соединении в сечении  $180^\circ$

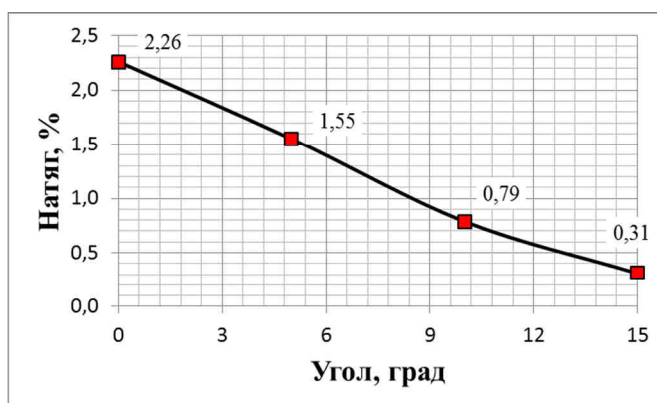


Рис. 16. Влияние угла конусности зенкованного отверстия на величину натяга в зоне закладной головки

Следует отметить существенную неравномерность натяга по толщине пакета. Максимальные натяги получены в нижней пластине, что объясняется наличием существенных радиальных смещений стенок отверстия в нижней пластине в процессе формирования замыкающей головки.

Проанализировано изменение эквивалентных напряжений по Мизесу, общей эквивалентной деформации и удельной энергии деформирования по толщине для верхней пластины в сечении  $0^\circ$  по оси отверстия (рис. 17–19).



Рис. 17. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу по толщине верхней пластины в сечении  $0^\circ$

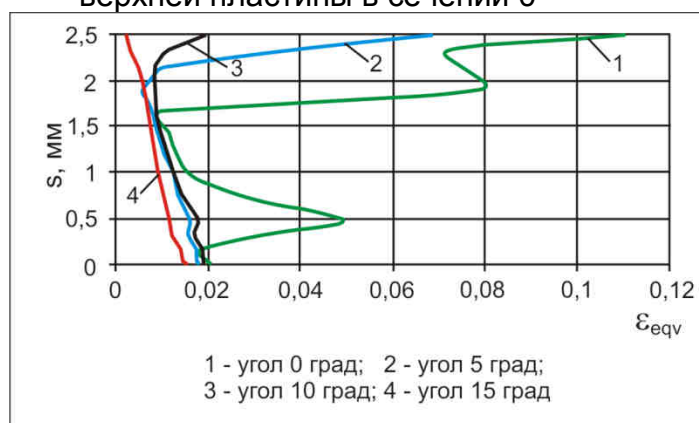


Рис. 18. Распределение общей эквивалентной деформации по Мизесу по толщине верхней пластины в сечении  $0^\circ$

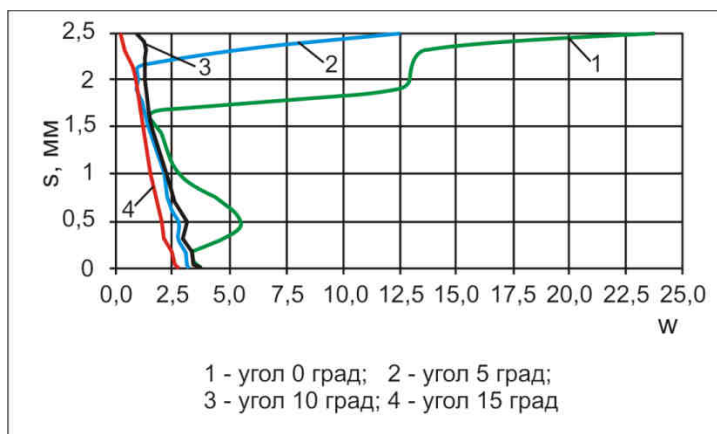


Рис. 19. Распределение удельной энергии деформирования по толщине верхней пластины в сечении  $0^\circ$

Показанные на рис. 17–19 величины распределяются неравномерно по толщине верхней пластины. Уменьшение угла конусности пояска зенкованного гнезда отверстия приводит к росту эквивалентных напряжений, общей деформации и удельной энергии деформирования, что объясняется увеличением радиального натяга в данной зоне.

**Вывод.** Для обеспечения герметичности соединения угол конуса гнезда отверстия в верхней пластине должен быть не более 5 град.

### Список литературы

1. Гребеников, А.Г. Анализ влияния геометрических параметров гнезда под установку прогрессивной потайной заклепки АНУ0348 на характеристики локального НДС в пластине с зенкованным отверстием [Текст] / А.Г. Гребеников, Д.Ю. Дмитренко, Д.В. Хмелик // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 49. – Х., 2011. – С. 248 - 262.
2. Авиационные материалы: в 8 т. [Текст] / под общ. ред. д-ра техн. наук Р.Е. Шалина. – М.: ОНТИ, 1982. – Т.4: Алюминиевые и бериллиевые сплавы. – 627 с.
3. ANSYS Element Guide. Chapter 3. Element References. Section 3.1. Element Library.001087. 4<sup>th</sup> Edition. SAS IP<sup>©</sup>.
4. ANSYS Contact Technology Guide. Chapter 3. Surface-to-Surface Contact. 001087. 4<sup>th</sup> Edition. SAS IP<sup>©</sup>.
5. Эксплуатация, обслуживание, ремонт, надежность [Текст] / Авиационный технический справочник; под общ. ред. В.Г. Александрова. – М.: Транспорт, 1969. – 412 с.
6. ANSYS Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear Structural Analysis. Section 8.4.1.1.1 Plastic Material Models. 001087. 4<sup>th</sup> Edition. SAS IP<sup>©</sup>.

Поступила в редакцию 12.03.2018

## **Дослідження впливу кута конусності пояска зенкованого гнізда отвору у заклепочному з'єднанні на розподіл радіального натягу за товщиною пакета**

Наведено результати дослідження впливу кута конусності пояска зенкованого гнізда отвору на розподіл радіального натягу за товщиною пакета. Розрахунковим шляхом встановлено, що натяг при клепанні розподіляється нерівномірно за товщиною. Збільшення кута конусності пояска отвору під закладну головку призводить до зниження величини натягу в цій зоні. Для забезпечення герметичності з'єднання кут конуса гнізда отвору у верхній пластині має бути не більше 5 град.

**Ключові слова:** заклепка, радіальний натяг, метод скінченних елементів, локальний напружено-деформований стан, пластичність.

## **Analysis of the Effect of the Conical Angle of a Countersunk Hole on the Distribution of Radial Interference in Riveting**

The results of the analysis of the effect of the conical angle of a countersunk hole on the distribution of radial interference along the stack thickness in riveting are given. It has been determined by calculation that interference in riveting is distributed non-uniformly along the stack thickness. The increase in the conic angle of the hole for the snap head leads to a decrease in the amount of interference in this zone. To ensure the tightness of the joint, the conic angle of the hole seat in the top plate should be not more than 5 degrees.

**Keywords:** rivet, radial interference, finite element method, stress-strain state, plasticity.

### **Сведения об авторах:**

**Александр Григорьевич Гребеников** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой 103 «Проектирование самолетов и вертолетов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

**Андрей Михайлович Гуменный** – канд. техн. наук, доцент кафедры 103 «Проектирование самолетов и вертолетов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

**Светличный Сергей Петрович** – старший преподаватель каф. 202, «теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем» Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.