

## **Верификация результатов численного моделирования процесса импульсной постановки болт-заклепок**

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

Проанализированы область использования болтозаклепочных соединений в авиационных конструкциях, особенности импульсных способов и ручного импульсного инструмента для постановки крепежа. Описана созданная конечно-элементная модель болтозаклепочного соединения, проведено сравнение результатов численного моделирования и натурного эксперимента.

**Ключевые слова:** верификация, болтозаклепка, пневмоимпульсное устройство, численное моделирование, макрошлиф.

### **Постановка проблемы, анализ проведенных исследований, цель работы**

Одним из основных требований, предъявляемых к современным воздушным судам, является обеспечение заданного ресурса, который в настоящее время для пассажирских самолетов установлен на уровне 70 тыс. летных часов.

Повышение работоспособности соединений силовыми точками обеспечивается при наличии не только радиального, но и осевого натяга. Такие возможности создают болтозаклепочные соединения, где независимо от квалификации исполнителя достигается усилие сжатия пакета в пределах 60...70% от разрушающей нагрузки стержня [1-2]. Кроме того, в болтозаклепочных соединениях возможно создание и радиального натяга, что делает соединения высокоресурсными. Принцип образования таких соединений – заполнение канавок стержня материалом кольца в процессе обжатия – позволяет получить стяжку как при западании, так и при выступании головки и гладкой части стержня в пакете.

Болтозаклепочные соединения достаточно широко применяют в авиационных конструкциях. Например, в изделиях Ил-86, Ил-96 их число достигает 130 тыс. шт. Это объясняется преимуществами болтозаклепочных соединений перед заклепочными и болтовыми соединениями:

- 1) меньший шум и отсутствие вибраций при постановке в отличие от ударной клепки;
- 2) трудоемкость и себестоимость в 1,5-2,0 раза, а масса в 1,2-1,5 раза меньше, чем у болтовых соединений;
- 3) в 2 раза выше по сравнению с болтовыми соединениями предел прочности на разрыв.

Болтозаклепочные соединения применяют в местах, не удобных для пресовой клепки и при больших толщинах пакета, а также вместо болтов в неразъемных соединениях (рис. 1).

Однако болтозаклепки имеют технологический хвостовик большой длины, который в процессе выполнения соединения отрывают.

Существует три метода постановки стержней болтозаклепок: на прессе, слесарным молотком с оправкой, многоударным или импульсным молотком. Первый метод обеспечивает требуемое качество соединений, но применение его ограничено из-за больших усилий запрессовки, больших габаритных размеров оборудования и ограниченных подходов к местам постановки крепежа. При этом установка болтозаклепок осуществляется специальными ручными гидравлическими прессами, работающими от пневмогидравлического агрегата (мультипликаторы) с

рабочим давлением 20...24 МПа.

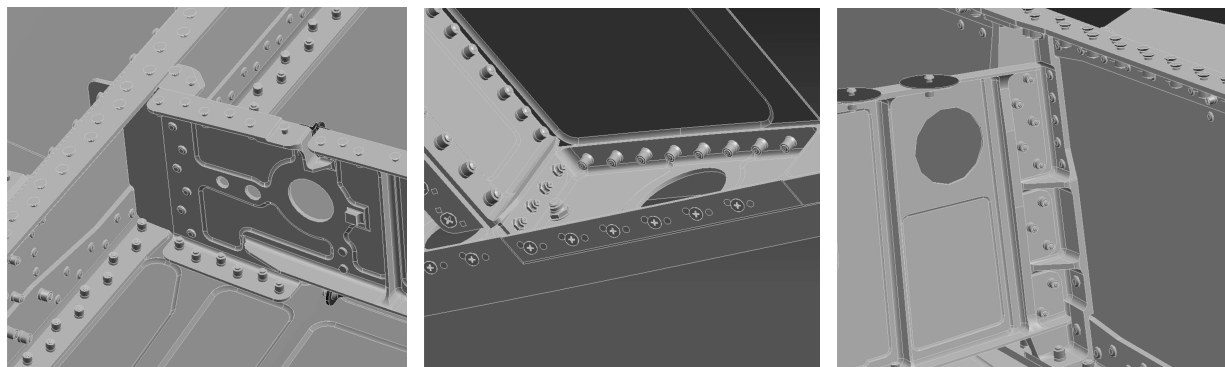


Рис. 1. Примеры использования болтозаклепок в конструкции современного пассажирского самолета

Импульсные технологии обладают рядом преимуществ по сравнению со статическими (прессовыми) технологиями [1-5]. Прежде всего, этим способом устанавливаются болтозаклепки без технологического хвостовика. Такие болтозаклепки позволяют снизить их металлоемкость на 30...60%. Поэтому исследование возможности установки болтозаклепок импульсным способом представляет определенный интерес.

Пневмоимпульсные устройства, сохраняя за собой все преимущества импульсных технологий, позволяют расширить возможность установки болтозаклепок в условиях стапельной сборки [4, 5].

Экспериментальные методы выбора рациональных технологических параметров процесса импульсной установки болтозаклепочных соединений в авиационных конструкциях требуют значительных материальных и временных затрат. Численное моделирование позволяет существенно повысить эффективность конструкции с точки зрения свойств, стоимости, доступности, технологичности, совместимости и надежности при условии сокращения времени поиска рациональных параметров технологического процесса и снижения материальных затрат на оптимизацию процесса.

Для получения адекватной численной модели импульсной установки болтозаклепочных соединений необходимо провести верификацию полученных результатов.

#### **Описание конечно-элементной модели технологического процесса импульсной установки болтозаклепочных соединений**

Процесс импульсного образования болтозаклепочных соединений при численном моделировании был разбит на два этапа (рис. 2):

- 1) забивка болта (рис. 2, а);
- 2) обжатие кольца (рис. 2, б).

При численном моделировании этапов импульсного образования болтозаклепочных соединений выполнены следующие виды работ:

- 1) геометрическое моделирование технологической системы (ТС), состоящей из стержня болтозаклепки, кольца, пакета, обжимок, поддержки и полиуретанового прижима (рис. 2);

- 2) моделирование физических свойств материалов элементов ТС;
- 3) задание контактных условий взаимодействия элементов ТС;
- 4) задание начальных условий работы элементов ТС.

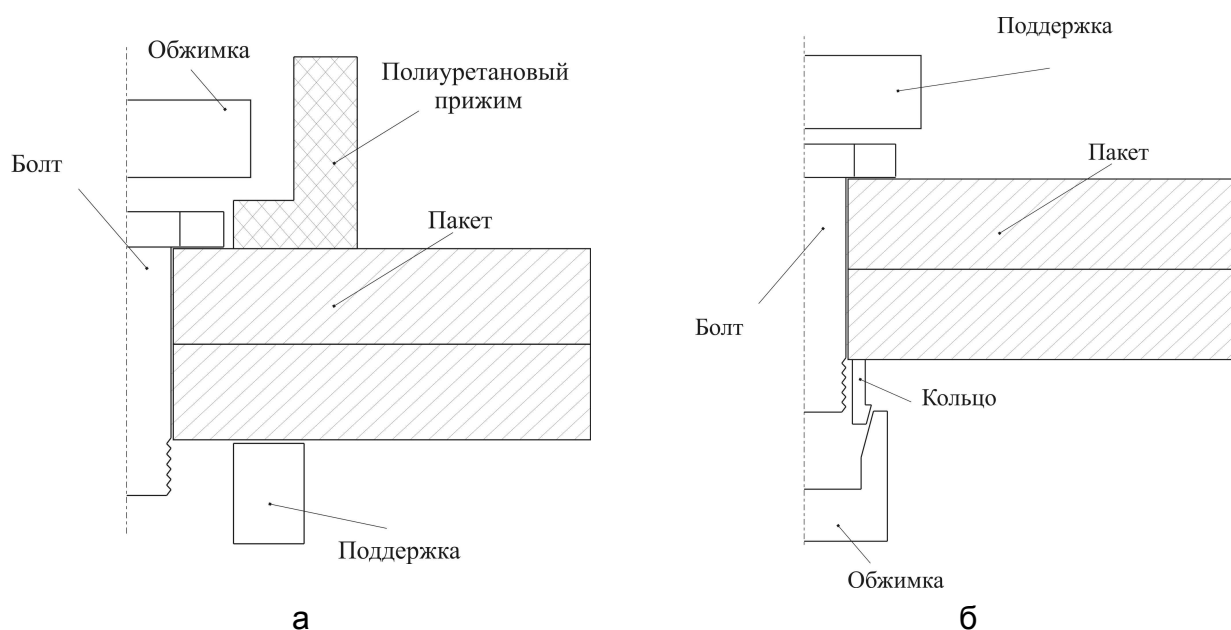


Рис. 2. Схема процесса импульсного образования болтозаклепочных соединений: а – забивка болта; б – обжатие кольца

При моделировании приняты следующие допущения:

- стержень болтозаклепки, обжимка и поддержка являются абсолютно жесткими телами;
- упрочнение материала кольца и пакета осуществляется по степенному закону;
- задача решена в осесимметричной постановке;
- трение на контактной поверхности описывается законом Амонта-Кулона;
- тепловые эффекты, вызванные пластическим деформированием, не учитываются.

При скоростных процессах пластического деформирования используют явный метод интегрирования дифференциальных уравнений.

Начальная скорость движения обжимки равна 20 м/с.

При моделировании использованы физико-механические характеристики (ФМХ) материалов Д16 (пакет) и В65 (кольца), которые представлены в таблице [7-9].

#### ФМХ материалов элементов, входящих в ТС

Материал	Модуль упругости $E$ , ГПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Предел прочности $\sigma_{0,2}$ , МПа	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициенты степенного закона	
					$B$	$m$
Д16Т	69	0,33	380	2720	$380 \cdot 10^6$	0,27
В65	71	0,31	365	2720	$290 \cdot 10^6$	0,4

## Сравнение результатов численного моделирования и натурального эксперимента технологического процесса импульсной установки болтозаклепочных соединений

Результаты численного моделирования распределения максимальных напряжений в пакете соединяемых деталей для обжимки с конической рабочей частью показаны на рис. 3.

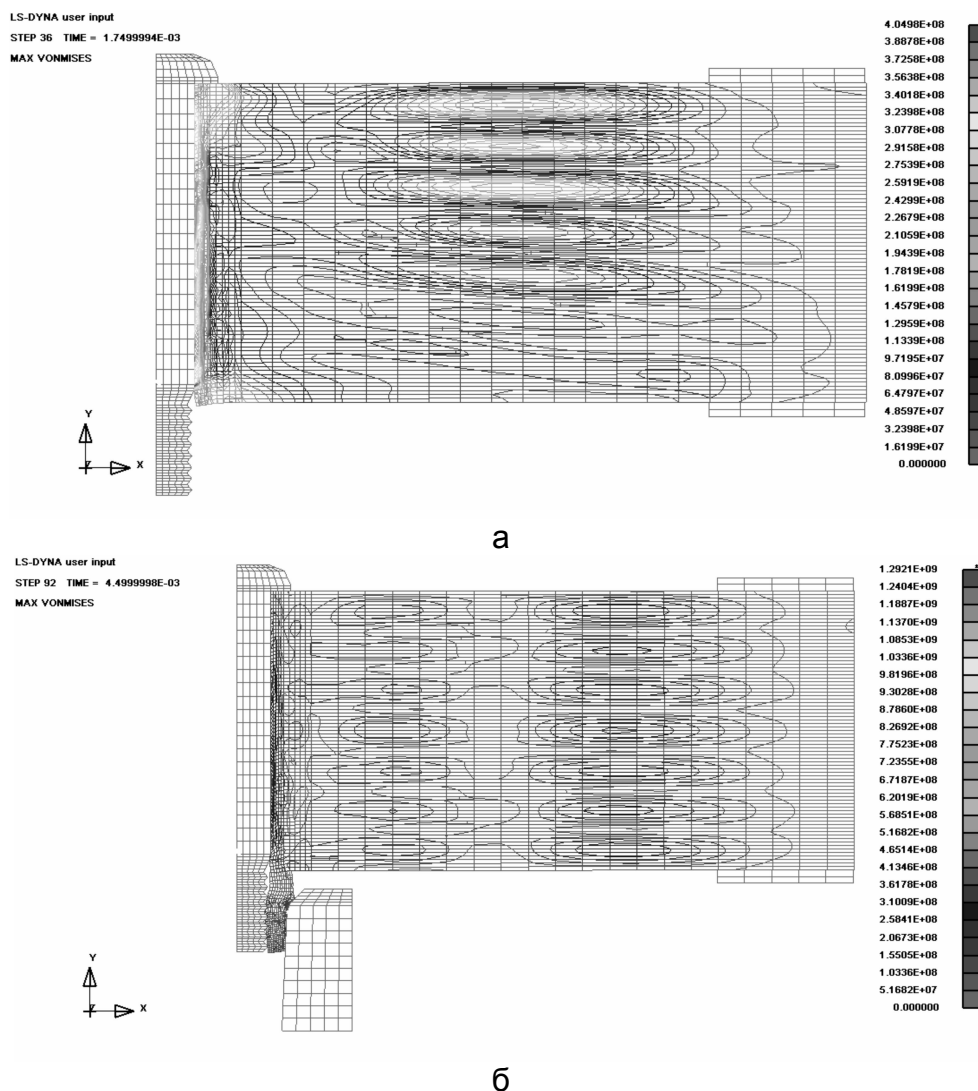


Рис. 3. Картина распределения максимальных напряжений в пакете соединяемых деталей для обжимки с конической рабочей частью: а – после забивки болта; б – при обжатии кольца

Аналогичные расчеты были проведены и для обжимки со сферической рабочей частью.

Сравнивая фото макрошлифов с расчетными данными численного моделирования, можно заметить, что геометрия заполнения материала кольца резьбовой части стержня заклепки в обоих случаях похожа (рис. 4), прилегание головки болтозаклепки к пакету также обеспечивается (рис. 5), что свидетельствует об адекватности разработанной численной модели процесса импульсной установки болтозаклепки в авиационных конструкциях.

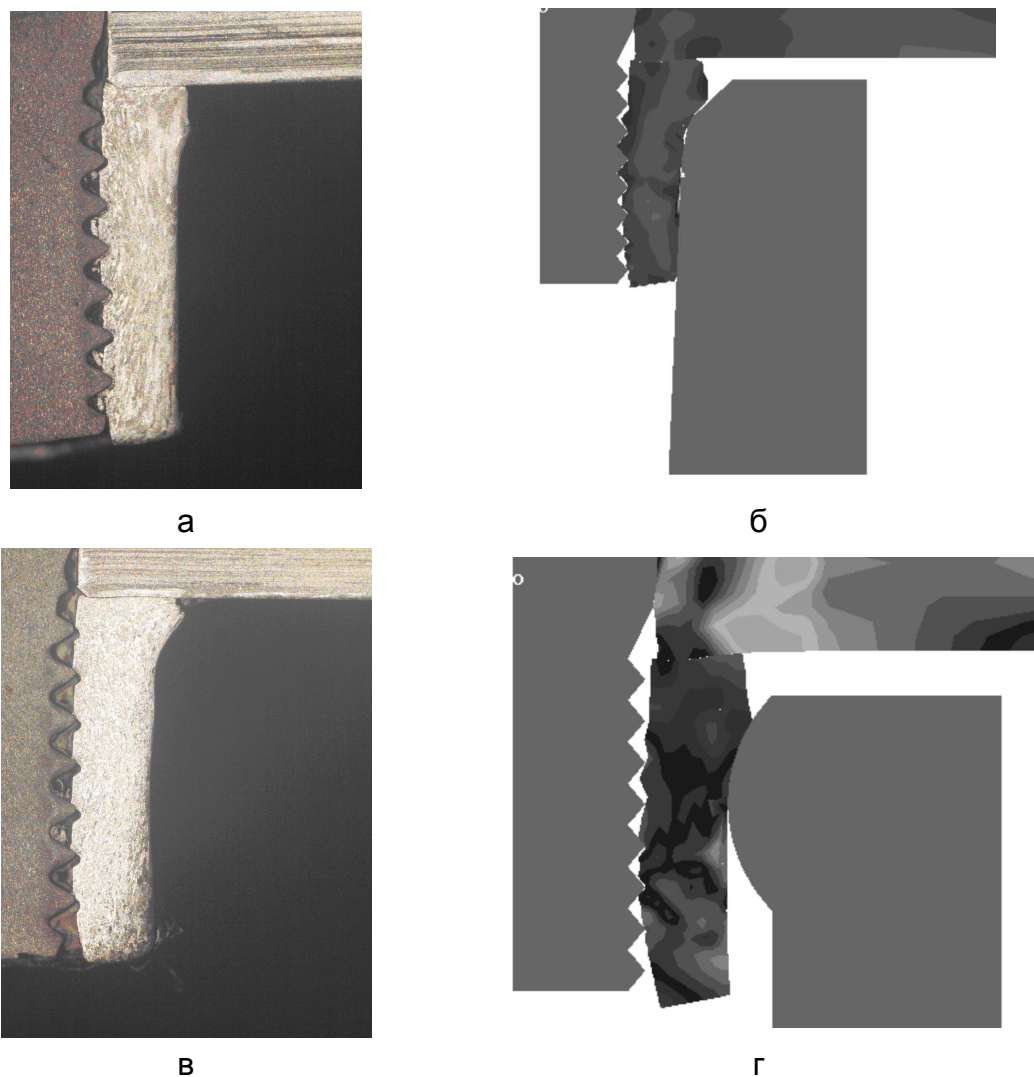


Рис. 4. Заполнение резьбовой части стержня болтозаклепки материалом кольца для обжимки с конической (а) и со сферической рабочей частью (в), а также картина распределения максимальных напряжений в районе кольца для обжимки с конической (б) и со сферической рабочей частью (г)

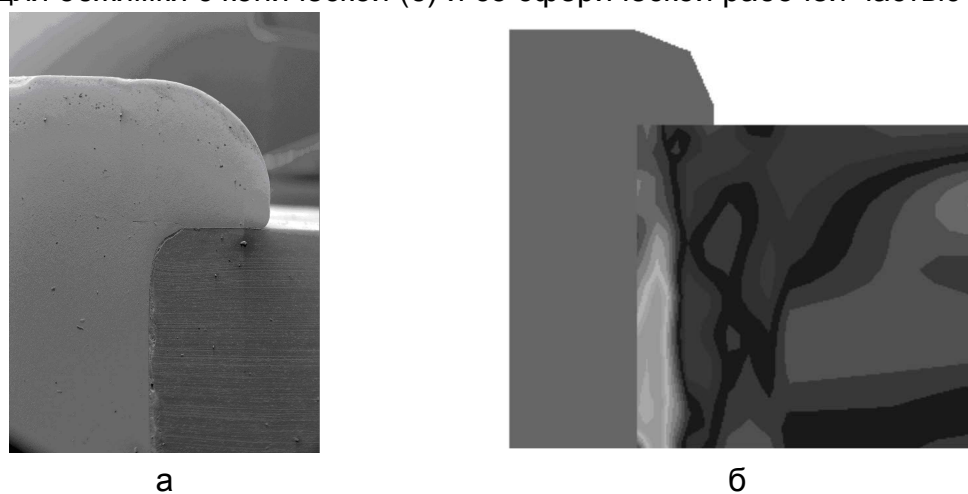


Рис. 5. Прилегание головки болтозаклепки к пакету: а – макрошлиф; б – картина распределения максимальных напряжений

## Выводы

1. Численное моделирование технологического процесса импульсной установки болтозаклепочных соединений с использованием LS-DYNA позволило получить адекватную численную модель.
2. Для определения рациональных параметров исследуемого технологического процесса необходимо провести многофакторный эксперимент с учетом результатов расчета таких параметров в LS-DYNA.

## Список литературы

1. Григорьев В.П. Сборка клепальных агрегатов самолетов и вертолетов / В.П. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Современные технологии авиастроения / под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.
3. Петриков В.Г. Прогрессивные крепежные изделия / В.Г. Петриков, А.П. Власов. – М.: Машиностроение, 1991 – 255 с.
4. Несолений В.С. Опыт внедрения и перспективы применения импульсных процессов выполнения соединений / В.С. Несолений // *Авиационная промышленность*. – 1987. – №12. – С.3-6.
5. Воробьев Ю.А. Исследование возможности образования болтозаклепочных соединений импульсным способом / Ю.А. Воробьев, В.В. Воронько, В.Н. Степаненко // *Зб. наук. праць Харк. ун-ту Повітряних Сил*. – Вип. 1 (19). – Х., 2009. – С. 129 – 132.
6. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / Пекарш А.И., Тарасов Ю.М., Кривов Г.А. и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.
7. Разработка технологического процесса и инструмента скоростного дорнования отверстий авиационных конструкций из алюминиевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02 / Воронько Виталий Владимирович. – Х., 2007. – 133 с.
8. Воробьев Ю.А. Сравнительный анализ способов дорнования отверстий / Ю.А. Воробьев, В.В. Воронько, В.Н. Степаненко // *Системи обробки інформації*. – Харківський університет Повітряних Сил, 2007. – Вып. 5 (63). – С. 35-38.
9. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Ф.В. Новиков, Харьковский национальный экономический университет, Харьков.

Поступила в редакцию 23.03.10

## **Верифікація результатів числового моделювання процесу імпульсного поставлення болт-заклепок**

Проаналізовано область використання болтозаклепкових з'єднань в авіаційних конструкціях, особливостей імпульсних способів і ручного імпульсного інструменту для постановки кріпильних деталей. Описано кінцево-елементну модель болтозаклепкового з'єднання, яка була створена; проведено порівняння результатів числового моделювання і натурального експерименту.

**Ключові слова:** Верифікація, болтозаклепка, пневмоімпульсний пристрій, числове моделювання, макрошліф.

## **Verification of numerical modeling results of bolt-rivets impulsive installation process**

In article is given the analysis of area of use a lock bolts for aviation structures, features of pulse ways and the manual pulse tool for fixture, the created is final-element model a connection lock bolts is described, raw an analogy of results of numerical modelling and natural experiment.

**Keywords:** Verification, lock bolt, air-impact device, numerical modelling, macro-section