

УДК 629.73.002

Ю.А. ВОРОБЬЕВ, В.В. ВОРОНЬКО, Ю.В. ДЬЯЧЕНКО, С.И. НОСА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИНХРОННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ КЛЕПКИ СТЕРЖНЯМИ С ПОМОЩЬЮ LS-DYNA**

*В статье приведен анализ проблем синхронной клепки авиационных конструкций, обоснована необходимость численного моделирования технологического процесса, приведены результаты моделирования синхронной импульсной клепки стержнями авиационных конструкций из алюминиевых сплавов с использованием программного комплекса для динамического анализа LS-DYNA на основе метода конечных элементов (МКЭ), определены рациональные энергетические параметры технологического процесса и пневмоимпульсного инструмента, а также геометрические параметры получаемых заклепочных соединений, обеспечивающие требуемое качество, статическую прочность и ресурс.*

**Ключевые слова:** заклепочные соединения, синхронная клепка, пневмоимпульсная клепка, клепальный молоток, численная модель.

**Введение**

Среди наиболее важных требований, предъявляемых к конструкциям современных воздушных судов (ВС), называют минимизацию массы, увеличение жесткости и прочности узлов, эксплуатационного ресурса, надежности конструкции. В значительной степени эти требования обеспечивает выбор вида крепежных элементов (КЭ) и совершенство технологии их постановки. При этом следует учитывать, что большинство соединений должны нести высокие нагрузки. Выполнение высоконагруженных соединений является одним из наиболее ответственных и трудоемких этапов агрегатной сборки планера ВС, трудоемкость которой составляет до 30% общей трудоемкости производства ВС. Поэтому степень конструктивно-технологического совершенства в значительной мере определяет уровень технологичности конструкции планера [1].

Одним из определяющих факторов ресурса и герметичности соединений является уровень и характер распределения радиального натяга в соединении. Рациональная величина радиального натяга в соединении определяется уровнем нагружения конструкции, применяемыми материалами и видом КЭ. При этом считается, чем более равномерным и рациональным по величине является радиальный натяг, тем больший ресурс имеет данное соединение [2]. Импульсная клепка позволяет регулировать как величину, так и характер распределения радиального натяга в соединении [3]. Наиболее равномерный характер распределения радиального натяга по толщине пакета соединяемых деталей среди заклепочных соединений имеют соединения, выполненные заклепка-

ми-стержнями или универсальными заклепками, т.к. деформирование осуществляется одновременно равномерно с обеих сторон. При этом долговечность соединений увеличивается в 10 раз [4].

Для осуществления синхронной клепки используют как универсальные заклепки УЗ, так и заклепки-стержни ЗУС, ЗПС (рис. 1).

Основной проблемой, возникающей при реализации процесса синхронной импульсной клепки, является синхронизация удара двух рабочих органов-инструментов.

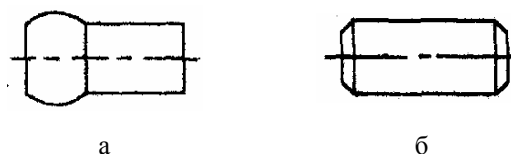


Рис. 1. Крепежные элементы, используемые для синхронной клепки: а – заклепка универсальная УЗ (ОСТ 1 34043-80); б – заклепка-стержень ЗУС, ЗПС (ОСТ 1 34012-76)

Особенно сложно решается вопрос синхронизации ударов двух пневмоимпульсных клепальных молотков ввиду инерционности энергоносителя – сжатого воздуха, наличия золотниковых пар, клапанов, характер срабатывания которых существенно зависит от величины сил трения в каждом элементе, пропускной способности воздушных каналов и т.д.

В Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ» разработана принципиальная схема импульсного устройства для двусторонней синхронной клепки (рис. 2). Такое устройство содержит две идентичные пневматические силовые головки в виде клепальных молотков 1 и 2, каждая из которых

имеет корпус 3, ствол 4 с возможностью вращения относительно продольной оси. В стволе размещен боек 5. Между корпусом и стволом имеется кольцевая полость (ресивер) 6 для сжатого воздуха. В передней части ствола выполнена полость 7, в которой подвижно монтирована обжимка. Обжимка имеет поршень 8, рабочую часть 9 и хвостовик 10. Хвостовик входит в полость 11 ствола, а рабочая часть 9 выходит наружу и непосредственно деформирует заклепку-стержень 12, установленную в склепываемый пакет 13.

Диаметры поршня 8, рабочая часть 9 и хвостовика 10 подобраны таким образом, что эффективная площадь поршня со стороны рабочей части 9 обжимки больше, чем площадь поперечного сечения хвостовика 10. Полость со стороны рабочей части обжимки соединена с полостью 11 ствола отверстием 14, а со стороны хвостовика связана отверстием 15 с атмосферой. Корпус молотка закрыт крышкой 16, в котором выполнено гнездо 17 для бойка 5 и герметичная полость 18. В крышке установлен одноступенчатый пусковой золотник 19, который одним концом входит в гнездо 17 для бойка, а другим концом входит в полость 18. Диаметр пускового золотника 19 существенно меньше диаметра бойка 5. В крышке 16 выполнено дроссельное отверстие 20, соединяющее гнездо 17 с атмосферой. Полость 18 постоянно связана с ресивером отверстием 21. На крышке 16 со стороны ствола выполнены выступы 22 с окнами 23. Соответственно этим окнам в стволе выполнены окна 24, через которые сжатый воздух из ресивера поступает в ствол при разгоне бойка.

В гнезде 17 установлен уплотнительный элемент 25, который препятствует возможным утечкам воздуха из ресивера 6 через гнездо 17 и далее через отверстие 20 в атмосферу. На корпусе подвижно установлена рукоятка 26 с пружиной 27. В рукоятке

расположен распределительный золотник 28 с продольным отверстием 29 и обратным клапаном 30.

Полости 11 стволов силовых головок соединены трубопроводом 31, в котором последовательно установлены два регулируемых дросселя 32. Между дросселями присоединен дренажный трубопровод 33, который связан со штуцером 34, ведущим в атмосферу, последовательно через распределительный золотник 28 каждого устройства.

Для подвода сжатого воздуха в ресивер и ствол силовой головки в ее рукоятке выполнены каналы 35, 36, 37, а подвод сжатого воздуха от сети к головке осуществляется от напорной магистрали 38. Ресивер 6 связан дополнительным каналом 39 непосредственно с напорной магистралью 38 через обратный клапан 40. Постоянство подаваемого давления в ресивер обеспечивается редуктором 41, установленным в напорной магистрали. Управление рабочей головкой осуществляется кнопкой 42, расположенной на рукоятке.

Устройство работает следующим образом. Перед нанесением удара каждая из силовых головок устанавливается рабочей частью обжимки 9 на склепываемый стержень заклепки 12, как показано на рисунке. После установки силовой головки на стержень заклепки и полной готовности к осуществлению рабочего хода оператор нажимает на кнопку 42. Удара не произойдет, пока второй оператор не установит свою силовую головку на заклепку и не нажмет на кнопку, так как дренажный трубопровод перекрыт распределительным золотником 28 второго оператора. Только в том случае, когда оба оператора установили силовые головки и нажали на кнопки, дренажный трубопровод 33 через каналы 36 и 32 каждой рукоятки и трубопровод 43 сообщается со штуцером 34, который связан с атмосферой.

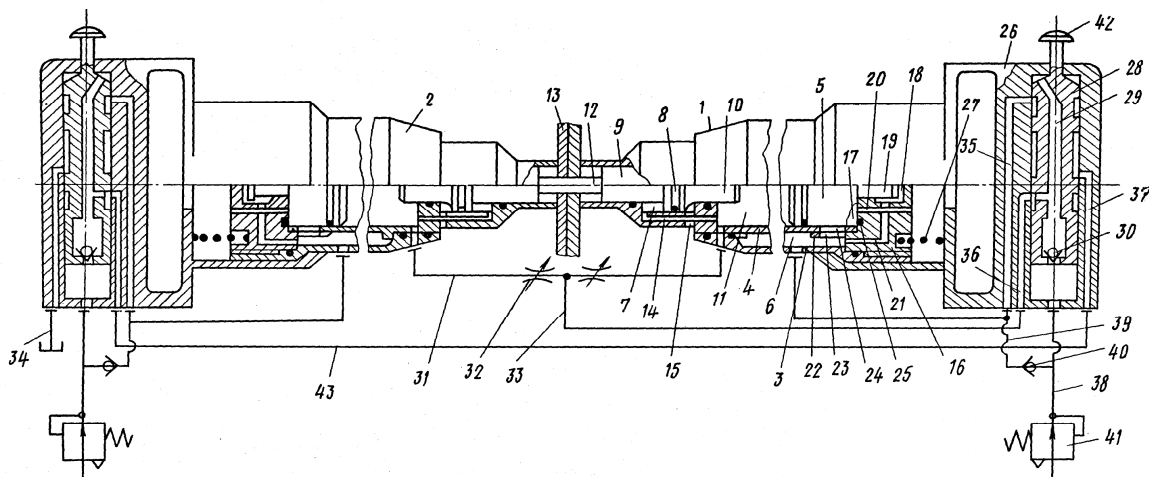


Рис. 2. Импульсное устройство для двусторонней клепки с силовыми головками, работающими от сжатого воздуха (А.с. № 39138 от 10.02.1981 г.)

Этим обеспечивается блокировка силовых головок. Воздух из стволов силовых головок по трубопроводу 31 через дроссели 32, дренажный трубопровод 33 и 43 стравливается в атмосферу через штуцер 34, а от напорной магистрали 38 через обратный клапан 30, отверстия 29 и 35 поступает в ресивер 6.

Давление в стволах падает, а в ресиверах силовых головок возрастает до постоянной величины, определяемой настройкой редуктора 41. Так как полость 18 в крышке замкнутая и соединена с ресивером отверстием 21, а гнездо 17 для бойка 5 связано с атмосферой через отверстие 20, то боек 5 каждой головки всегда прижат к уплотнению 25, а пусковые золотники 19 прижаты к бойкам и воздействуют на них с некоторым усилием. Поскольку диаметр бойка 5 существенно больше, чем диаметр пускового золотника 19, то боек каждой головки может выдвинуться из гнезда 17 при определенном перепаде давлений в полости 11 ствола и полости 18, связанной с ресивером, определяемом соотношением диаметров бойка 5 и пускового золотника 19. Так как давление воздуха в ресиверах 4 с помощью редуктора 41 поддерживается постоянным, то пусковые золотники 19 головки перемещаются одновременно и выдвигают бойки из гнезд всегда при одном и том же падении давления в стволе, существенно меньшем, чем давление в ресивере. Бойки 5 одновременно выходят из гнезд и открывают окна 24. Сжатый воздух через окна 23 и 24 воздействует на бойки и разгоняет их навстречу друг другу. Бойки наносят удар по хвостовикам 10 обжимок, которые производят деформирование заклепки 12. После удара кнопки 42 опускают и золотники 28 под действием сжатого воздуха перемещаются в исходное положение. При этом полость 11 ствола каждой головки соединяется через каналы 36, 29 и клапан 30 с напорной магистралью 38, а ресивер 6 запирается. Попаданию сжатого воздуха в ресивер через дополнительный клапан 39 препятствует обратный клапан 40. Сжатый воздух, поступая в ствол, перемещает боек в исходное положение, поскольку давление в ресивере расширившегося воздуха, действующего с противоположной стороны на боек, ниже, чем поступающего через канал 36 от напорной магистрали 38. Происходит сжатие газа в ресивере до исходного значения. При вхождении бойка в гнездо 17 последний воздействует на пусковой золотник 19 и перемещает его в исходное положение, а сам прижимается к торцевому уплотнению 25, чем исключает возможные утечки сжатого воздуха из ресивера через дренажное отверстие 20 в атмосферу. Эти утечки не вызывают смещение бойка, так как полость гнезда 17 сообщена с атмосферой. Одновременно при подаче давления в полость 11 ствола сжатый воздух через отверстие 14 попадает в полость 7. По-

скольку эффективная площадь поршня 8 со стороны рабочей части 9 обжимки больше, чем площадь поперечного сечения хвостовика 10, то обжимка перемещается самостоятельно в исходное положение до упора, обеспечивая себе свободу перемещения для деформирования заклепки при ударе.

Устройство готово для осуществления следующего рабочего хода.

Импульсное устройство для двусторонней клепки с силовыми головками, работающими от сжатого воздуха, характеризуется простотой его конструкции, эксплуатации и обслуживания, высоким КПД и стабильностью контролируемых параметров качества заклепочного соединения.

При внедрении новых технологий основной технологической задачей является поиск рациональных параметров технологического процесса (ТП) и средств технологического оснащения, исходя из требований обеспечения требуемого качества, минимальной трудоемкости и стоимости. Для получения достоверной картины проводят, как правило, полнофакторный эксперимент. Однако ввиду дороговизны таких экспериментов, их большой продолжительности, необходимости учета большого числа определяющих факторов возникает острая потребность в численном моделировании процесса с целью поиска его рациональных параметров. С помощью численного моделирования процесс определения рациональных параметров значительно сокращает как временные, так и финансовые затраты.

## 1. Формулирование проблемы

При синхронной клепке стержнями основными требованиями являются геометрические параметры соединений, которые регламентированы нормативными документами. К таким параметрам относят, прежде всего, диаметр и высоту выступающих головок для непотайных заклепок и высоту выступления потайной головки для потайных соединений. В данной статье с помощью численного моделирования синхронной импульсной клепки стержнями авиационных конструкций определялись рациональные параметры технологического процесса.

## 2. Описание конечно-элементной модели ТП синхронной импульсной клепки

При моделировании процесса синхронной импульсной клепки выполнены следующие виды работ:

- геометрическое моделирование технологической системы (ТС), состоящей из заклепки (стержня), обжимок, пакета и полиуретановых прижимов (рис. 3);
- моделирование физических свойств материалов элементов ТС;

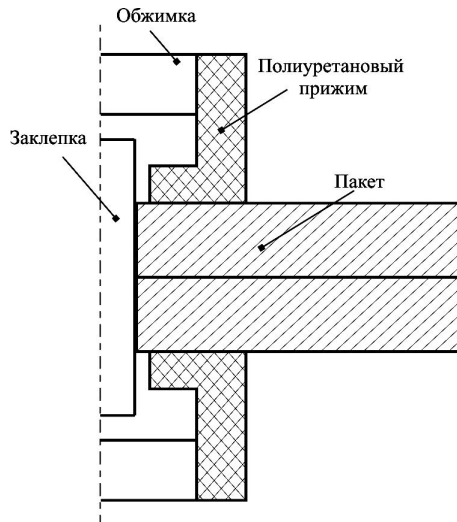


Рис. 3. Схема процесса синхронной импульсной клепки

- задание контактных условий взаимодействия элементов ТС;
- задание начальных условий работы элементов ТС.

При моделировании приняты следующие допущения:

- обжимка является абсолютно жестким телом;
- упрочнение материала осуществляется по степенному закону (заклепка и пакет);
- задача решена в осесимметричной постановке;
- трение на контактной поверхности описывается законом Амонта-Кулона;
- тепловые эффекты, вызванные пластическим деформированием, не учитываются.

При решении скоростных процессов пластического деформирования используют явный метод интегрирования дифференциальных уравнений.

### 3. Численное моделирование ТП синхронной импульсной клепки стержнями

При моделировании синхронной импульсной клепки стержнями приняты следующие параметры технологического процесса (рис. 4) [1 – 4]:

– параметры пакета: две соединяемые детали толщиной  $S_1 = S_2 = 5$  мм; материал пластин – алюминиевый сплав Д16Т ("MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY":  $E = 69$  ГПа,  $\mu = 0,33$ ,  $\sigma = B\varepsilon^m$ , где  $B = 380 \cdot 10^6$  и  $m = 0,27$ );

– параметры заклепки: материал заклепки В65; диаметр  $d_3 = 4 + 0,04$  мм ("MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY":  $E = 71$  ГПа,  $\mu = 0,31$ ,  $\sigma = B\varepsilon^m$ , где  $B = 290 \cdot 10^6$  и  $m = 0,4$ );

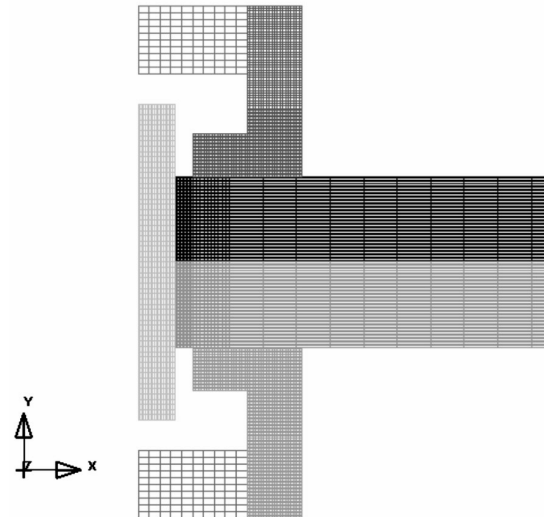


Рис. 4. КЭМ синхронной импульсной клепки стержнями

- параметры отверстия:  $d_{\text{отв}} = 4,05 + 0,08$  мм;
- коэффициент трения равен 0,15;
- обжимка изготовлена из титанового сплава BT22 ("MAT\_RIGID":  $E = 210$  ГПа,  $\mu = 0,28$ );
- полиуретановые прижимы с обеих сторон из СКУ-7Л ( $\mu = 0,499$ , константы материала  $C01 = 137895$  Па и  $C10 = 551580$  Па);
- параметры гнезда: глубина гнезда  $h_{\text{гн}} = 1,6 + 0,1$  мм, угол при вершине  $\alpha = 82^\circ$  (для соединений с потайными головками).

Конечно-элементная модель напряженно-деформированного состояния (КЭМ НДС) непотайного соединения показана на рис. 5.

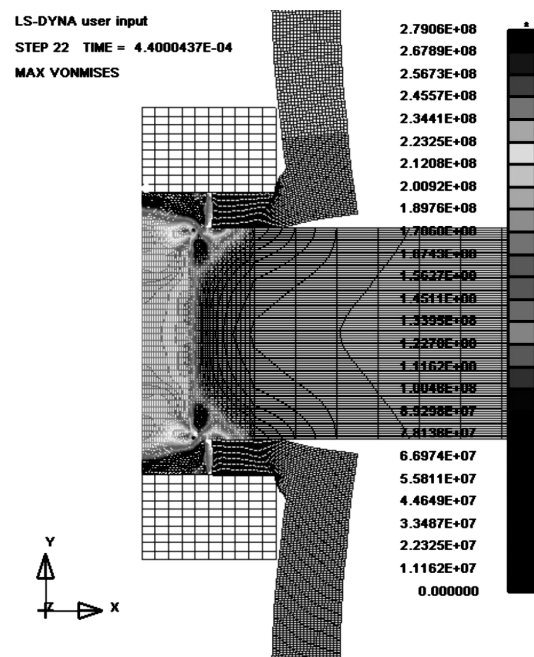


Рис. 5. КЭМ НДС непотайного соединения после синхронной импульсной клепки стержнями

Результаты численного моделирования синхронной импульсной клепки стержнями непотайных соединений показали, что:

- минимальная высота стержня равна 18,2 мм (рис. 6);
- необходимая энергия одного пневмоимпульсного молотка  $E = 15,3$  Дж, т.е. суммарная энергия процесса синхронной импульсной клепки с образованием непотайных соединений  $E = 30,6$  Дж.

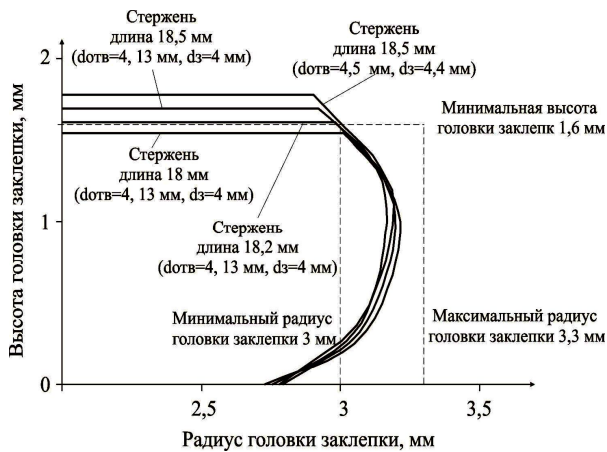


Рис. 6. Геометрические параметры головки заклепки непотайного соединения после синхронной импульсной клепки стержнями

КЭМ НДС потайного соединения показана на рис. 7.

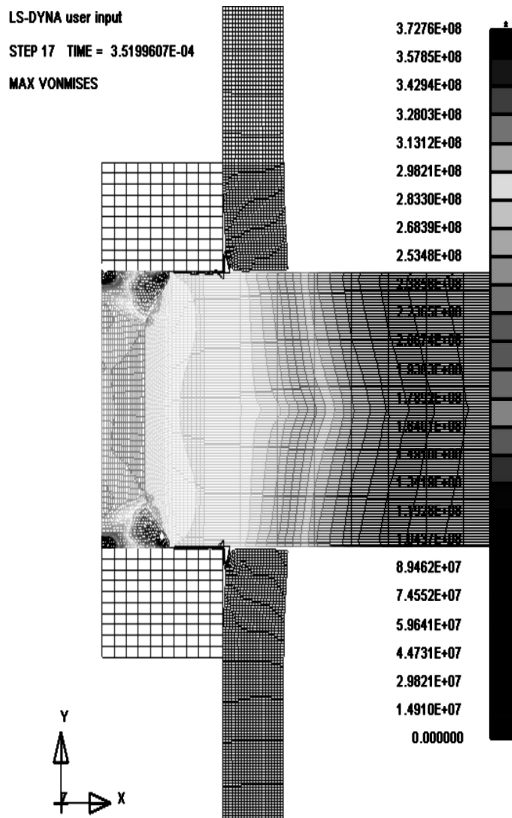


Рис. 7. КЭСМ НДС потайного соединения после синхронной импульсной клепки стержнями

Результаты численного моделирования синхронной импульсной клепки стержнями потайных соединений показали, что высота стержня равна 14,5 мм, при необходимой суммарной энергии 43 Дж.

Получив результаты технологического процесса синхронной импульсной клепки стержнями для потайных и непотайных соединений, скомбинируем два эти варианта в одном соединении.

КЭМ НДС комбинированного соединения показана на рис. 8.

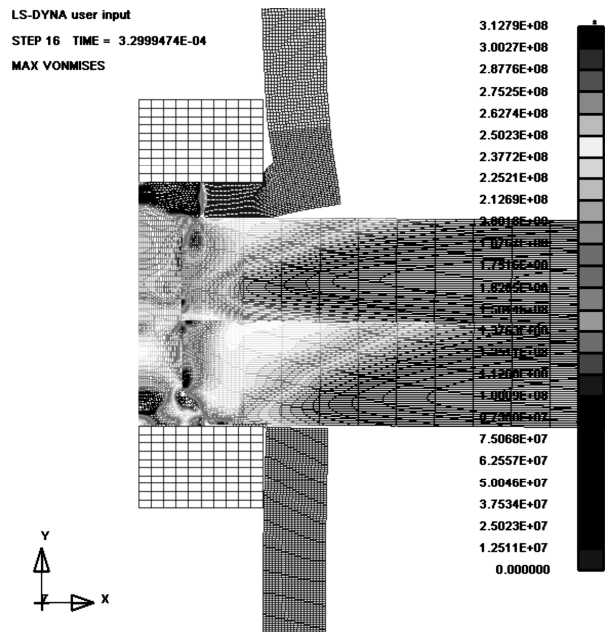


Рис. 8. КЭМ НДС комбинированного соединения после синхронной импульсной клепки стержнями

## Заключение

Итогами данной работы являются:

1. Разработана КЭМ ТП синхронной импульсной клепки стержнями потайных и непотайных соединений.
2. Определены рациональные параметры технологического процесса синхронной импульсной клепки стержнями, которые обеспечивают требуемое качество различных видов соединений.

Исходя из результатов численного моделирования необходимо:

1. Разработать КЭМ ТП синхронной импульсной клепки универсальными заклепками.
2. Разработать пневмоимпульсное устройство с точной дозировкой энергии.

## Литература

1. *Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / А.И. Пекари, Ю.М. Тарасов, Г.А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.*

2. Воробьев Ю.А. Разработка технологического процесса и инструмента импульсной клепки авиационных конструкций из углепластика: Дис...канд. техн. наук: 05.07.04 / Воробьев Юрий Анатольевич. – Х., 2004. – 166 с.

3. Воробьев Ю.А. Исследование качества заклепочных соединений авиационных конструкций из

КМУ / Ю.А. Воробьев // *Авиационно-космична техніка і технологія*. – 2003. – Вып. 2 (37). – С. 41-44.

4. Основы технологии производства летательных аппаратов: учеб. пособие / А.С. Чумадин, В.И. Еришов, В.А. Барвинок и др. – М.: Наука и технология, 2005. – 912 с.

Поступила в редакцию 15.01.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры техники и технологии Ф.В. Новиков, Харьковский национальный экономический университет, Харьков.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СИНХРОННОЇ ІМПУЛЬСНОЇ КЛЕПКИ СТРИЖНЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ LS-DYNA

*Ю.А. Воробйов, В.В. Воронько, Ю.В. Дьяченко, С.І. Носа*

У статті приведений аналіз проблем синхронної клепки авіаційних конструкцій, обґрунтована необхідність чисельного моделювання технологічного процесу, приведені результати моделювання синхронної імпульсної клепки стержнями авіаційних конструкцій з алюмінієвих сплавів з використанням програмного комплексу для динамічного аналізу LS-DYNA на основі методу скінчених елементів (МСЕ), визначені раціональні енергетичні параметри технологічного процесу і пневмоімпульсного інструменту, а також геометричні параметри отримуваних заклепувальних з'єднань, що забезпечують необхідну якість, статичну міцність і ресурс.

**Ключові слова:** заклепувальні з'єднання, синхронна клепка, пневмоімпульсна клепка, клепальний молоток, числова модель.

### DESIGNING OF THE PNEUMOIMPULSE DEVICE FOR HIGH-SPEED APERTURE BURNISHING IN AIRCRAFT CONSTRUCTIONS

*Yu.A. Vorobyov, V.V. Voronko, Yu.V. Djatschenko, S.I. Nosa*

In the article on the basis of method of eventual elements the numeral design of technological process of synchronous impulsive stave is executed by the bars of aviation constructions from aluminium alloys, realized by the pneumoimpulsive hammers of the type MPI, the power and geometrical parameters of technological process of impulsive synchronous stave of the bars-rieveting executed with salient and secret heads are certain, providing the required quality of connections, static capacity and resources; this was done by the bundled software Ls-DYNA.

**Keywords:** rieveting connections, synchronous rieveting, pneumoimpulsive rieveting, rieveting hammer, numeral model.

**Воробьев Юрий Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: yuriy.vorobyov@gmail.com.

**Воронько Виталий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: vitaliy.voronko@gmail.com.

**Дьяченко Юрий Вениаминович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: yvd50@gmail.com.

**Носа Станислав Иванович** – соискатель кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: nsivika@ukr.net.