УДК629.7.023.002

В.В. Воронько, Ю.А. Воробьев, Ю.В. Дьяченко, А.С. Профатилова

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМЫХ СБОРОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЯХ С ЧПУ

Статья посвящена вопросам повышения точности сборки плоских узлов авиационных конструкций, автоматизации сборочных работ и работ по технологической подготовке производства за счет использования метода «сборки по виртуальным базам» с применением специализированных переналаживаемых приспособлений с ЧПУ взамен специальных сборочных приспособлений или специализированных переналаживаемых сборочных приспособлений традиционной конструкции. Приведены результаты выполненных экспериментов и проведенных расчетов точности сборки при различных методах обеспечения взаимозаменяемости.

Ключевые слова: *сборка, плоский узел, специализированное переналаживаемое сборочное приспособление, погрешность сборки, метод увязки.*

Введение

Современные заказы на самолеты гражданской авиации носят единичный характер, что приводит к частой сменяемости объектов производства или к значительным модификациям изделий в процессе производства. Эти изменения существенно отражаются на содержании всех технологических процессов, что особенно влияет на сборочные работы: выбор методов сборки, методы обеспечения взаимозаменяемости, изготовление новой или доработку имеющейся сборочной оснастки. Это приводит к тому, что, несмотря на высокую потребность в самолетах гражданской авиации, заказы на них остаются невыполненными в срок или их выпуск существенно затягивается, т.к. отечественный производитель не может обеспечить программу выпуска с высоким качеством и в кратчайшие сроки.

Развитие сборочных технологий направлено на их роботизацию и автоматизацию, что требует совершенствования существующих или разработку новых методов сборки и увязки, основанных на применении специализированных переналаживаемых приспособлений с ЧПУ (СПП с ЧПУ) [1 - 4].

Постановка задачи

Влияние случайных факторов проявляется в рассеивании размеров исследуемого объекта. Для определения суммарной погрешности при определении точности позиционирования СПП с ЧПУ используют вероятностно-статистический метод, вследствие того, что погрешность СПП с ЧПУ зависит от погрешности шагового двигателя, погрешности изготовления выдвижных штырей, погрешности линейной и круговой интерполяции управляющей программы (УП).

В данной статье исследовалась точность позиционирования установочных и фиксирующих элементов СПП с ЧПУ. Для этого на примере нервюры №18 крыла Ан-148 (рис. 1) для верхнего пояса был изготовлен рубильник и составлены УП (табл. 1), на основании которых приспособление настраивалось для базирования и закрепления верхнего пояса нервюры №18.

Рис. 1. Детали нервюры №18 крыла самолета Ан-148

Основные результаты

Для программируемого рубильника СПП с ЧПУ в табл. 1 приведены координаты точек позиционирования штырей (рис. 2).

Таблица 1

Координаты точек позиционирования штырей

№ точки	1	2	3	4	5
Координата, мм	110,25	102,50	96,35	91,20	86,30
№ точки	6	7	8	9	10
Координата, мм	82,25	80,10	77,25	77,45	78,10

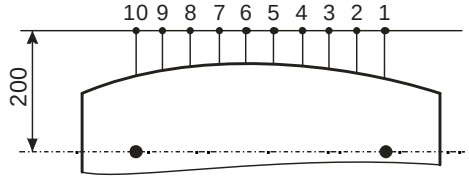

Рис. 2. Схема позиционирования штырей

УП для позиционирования смещения штырей программируемого рубильника СПП с ЧПУ приведены в табл. 2.

Таблица 2

УП в кодах точек позиционирования штырей

Номер штыря	Величина смещения штыря, мм	УП в кодах JSO-7 для смещения штыря
1	110,25	%N001 G91LF N002 G01F240Z-55125LF N003 Z+55125LF N004 M002LF
2	102,50	%N001 G91LF N002 G01F240Z-51250LF N003 Z+51250LF N004 M002LF
3	96,36	%N001 G91LF N002 G01F240Z-48175LF N003 Z+48175LF N004 M002LF
4	91,20	%N001 G91LF N002 G01F240Z-45600LF N003 Z+45600LF N004 M002LF
5	86,30	%N001 G91LF N002 G01F240Z-43150LF N003 Z+43150LF N004 M002LF
6	82,25	%N001 G91LF N002 G01F240Z-41125LF N003 Z+41125LF N004 M002LF
7	80,10	%N001 G91LF N002 G01F240Z-40050LF N003 Z+40050LF N004 M002LF
8	77,25	%N001 G91LF N002 G01F240Z-38625LF N003 Z+38625LF N004 M002LF
9	77,45	%N001 G91LF N002 G01F240Z-38725LF N003 Z+38725LF N004 M002LF
10	78,10	%N001 G91LF N002 G01F240Z-39050LF N003 Z+39050LF N004 M002LF

На рис. 3, а представлен этап подготовки программируемого рубильника к работе, рубильник в рабочем положении приведен на рис. 3, б.

Погрешность повторяемости выдвижения штыря в заданную УП координату проверялась с помощью индикатора часового типа (цена деления 1 мкм). Результаты позиционирования для 50 повторных перемещений на заданную УП координату представлены в табл. 3.

Схема разбивки погрешности многократного позиционирования штыря на интервалы приведена на рис. 4.

Последовательность работ была следующая:

а) по оси абсцисс откладывают общие значения выбранных интервалов и определяют середины интервалов L_i;

б) по оси ординат в середине каждого интервала откладывают значения количества измерений n_i, отклонения которых попадают в данный интервал;

а

б

Рис. 3. Этапы настройки выдвижных штырей из обоймы двухкоординатного стенда с ЧПУ: а – задание исходного положения обоймы; б – программное позиционирование штырей в обойме

Таблица 3

Результаты позиционирования

№ позиции	Погрешность позиционирования	№ позиции	Погрешность позиционирования
1	+4	26	-4
2	-2	27	+1
3	+2	28	-4
4	-2	29	0
5	+2	30	+1
6	-1	31	+3
7	0	32	+1
8	+2	33	-3
9	-1	34	-4
10	-3	35	-2
11	0	36	-3
12	-1	37	+2
13	+2	38	+4
14	-3	39	-3
15	0	40	0
16	-1	41	-1
17	-1	42	-1

18	+2	43	-3
19	0	44	-3
20	-2	45	-1
21	+1	46	-4
22	-2	47	-1
23	0	48	+2
24	-4	49	-2
25	+2	50	-2

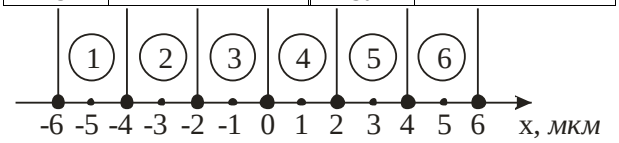

Рис. 4. Схема разбивки на интервалы погрешности позиционирования

в) центр группирования $L_{ср}$ отклонения определяют как среднее арифметическое значение величины параметра в измеряемой партии:

$$L_{ñð} = \sum L_i / N ,$$

где N –количество измеряемых величин.

Кривую распределения погрешностей строят по данным табл. 4.

Систематические постоянные погрешности на форму распределения не влияют, а способствуют только смещению центра группирования. Случайные погрешности влияют как на форму кривой распределения, так и на величину рассеивания погрешностей.

Таблица 4

Расчет распределения погрешностей

Интервал	Граница интервала, *мкм*	L_i ,*мкм*	n_i	$L_i \cdot n_i$	$L_i - L_{ñð}$	$(L_i - L_{ñð})^2$	$(L_i - L_{ñð})^2 \cdot n_i$
1	-6...-4	-5	2,5	-12,5	-4,38	19,184	47,961
2	-4...-2	-3	13	-39	-2,38	5,664	73,637
3	-2...0	-1	15	-15	-0,38	0,144	2,166
4	0...+2	+1	12,5	+12,5	1,62	2,624	32,805
5	+2...+4	+3	6	+18	3,062	9,375	56,251
6	+4...+6	+5	1	+5	5,62	31,581	31,581

Величина рассеивания погрешностей характеризуется средним квадратичным отклонением:

$$\sigma = \sqrt{\sum \left(L_i - L_{ср}\right) \cdot n_i / N} .$$

Произведем расчет отклонений L_i , *мкм*:

1) 0+0+2,5=2,5; 2) 3,5+5+4=12,5; 3) 3,5+8+3,5=15;
4) 3,5+5+4=12,5; 5) 4+1+1=6; 6) 1+0+0=1.

Произведем расчет центр группирования отклонения $L_{ñð}$:

$$L_{ср} = \frac{\sum L_i \cdot n_i}{\sum n_i} = -0,62 \text{ мкм},$$

$$\sum (L_i \cdot n_i)^2 \cdot n_i = 244,392 ,$$

$$\frac{\sum (L_i \cdot n_i)^2 \cdot n_i}{\sum n_i} = 4,829 .$$

Величина рассеивания характеризуется средним квадратичным отклонением:

$$\sigma = \sqrt{4,887} = 2.21 ; \quad 3\sigma = 6,63 ; \quad 6\sigma = 13,26 .$$

Кривые распределения, полученные на основе результатов эксперимента, представляют собой ломаные линии. Такая экспериментальная кривая распределения служит только для первой, приближенной оценки точностных показателей процесса, правильности обработки результатов эксперимента, а также утверждения решения про выбор теоретического закона для характеристики данного распределения.

Рассчитываем величины предельных отклонений с учетом значения коэффициента асимметрии поля рассеяния погрешностей α:

$$\alpha = \frac{L_{ñð} - 0,5Ò}{0,5Ò} = \frac{-0,62 - 10}{10} = -1,062,$$

$$ÂO = L_{ñð} + \frac{3\sigma}{k} = -0,62 + 6,63 = -6,01 \text{ мкм},$$

$$Í O = L_{ñð} - \frac{3\sigma}{k} = -0,62 - 6,63 = -7,25 \text{ мкм},$$

где *k* – коэффициент относительного рассеивания (для Гаусса $k \le 1$).

Далее строим кривую Гаусса распределения погрешностей многократного позиционирования штыря в ССП с ЧПУ (рис. 5).

Запас точности при этом $\psi = Ò/(6\sigma)$, для допуска $T = \pm 10$ *мкм* – $\psi = \frac{20}{13,26} = 1,50$.

Рекомендуемый для станков с ЧПУ запас точности $\psi \le 12\%$, следовательно, СПП с ЧПУ имеет четырехкратный гарантированный запас точности для координированного позиционирования установочных

элементов.Выполним сравнительный анализ точности сборки узлов по обводам для различных вариантов применяемых методов увязки.

Погрешность сборки узла в приспособлении определяется следующими составляющими:

1. Погрешностью $\Delta_{пр}$ носителя размеров, т. е. приспособления.

2. Погрешностью $\Delta_{баз}$ базирования устанавливаемой детали.

Величина погрешности базирования характеризуется зазором между рубильником приспособления и поверхностью детали (нервюры, стрингера, обшивки и т. п.). Этот зазор можно уменьшить, прижав деталь к поверхности рубильника. При этом деталь упруго деформируется, а в дальнейшем фиксируется заклепками или болтами.

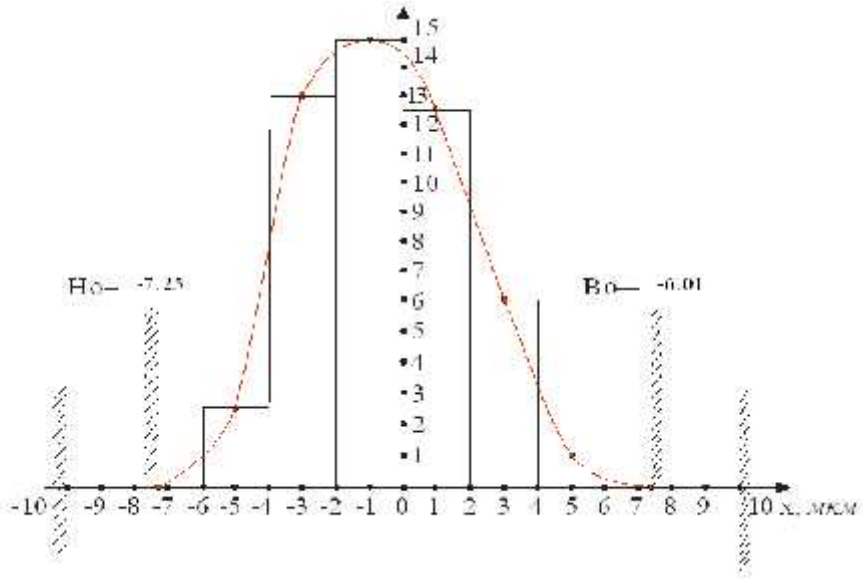

Рис. 5. Кривая Гаусса распределения погрешностей позиционирования штыря

3. Погрешностями $\Delta_{проч}$ от поводок и смещений, вызванных образованием соединений, прогибами приспособления в процессе сборки и прочими не зависящими от метода сборки причинами.

Итак, погрешность сборки:

$$\Delta_{сб} = \Delta_{пр} + \Delta_{баз} + \Delta_{проч} .$$

Здесь $\Delta_{проч}$ составляет около 40% общей погрешности (для образования соединений заклепками при сборке узлов и панелей), т. е. $\Delta_{проч} = 0{,}4\Delta_{сб}$.

Поскольку зазор между лекалом и деталью равен погрешности увязки приспособления и детали $C_{контур\ пр\text{-}дет.}$, то без прижима

$$\Delta_{баз\ 1} = C_{контур\ пр\text{-}дет.}$$

Фактический же зазор (при наличии прижимов) будет меньше, поэтому

$$\Delta_{баз2} = K_{приж}\, C_{контур\ пр\text{-}дет.}$$

Величину $K_{приж}$ принимаем равной 1, считая, что осуществляется сборка в приспособлении без прижимов.

Итак, погрешностьсборки в приспособлении определяется по формуле

$$\delta_{сб} = \delta_{пр} + C_{контур\ пр\text{-}дет.} + \delta_{проч}.$$

Для проведения точностного анализа выберем один из зависимых методов увязки, наиболее широко применяемый для сборки плоских узлов и панелей одинарной кривизны – плазово-инструментальный метод (ПИМ) в системе плаз-кондуктора (ПК), и два независимых метода – программно-инструментальный метод с использованием ПК и станков с ЧПУ (ПРИМ) и предложенный перспективный метод – программно-инструментальный метод с использованием СПП с ЧПУ (ПРИМ с ЧПУ увязки). Рассчитаем погрешность сборки для этих трех методов и проведем сравнительный анализ точности сборки плоского узла по обводообразующему элементу – поясу нервюры (погрешность контура).

ПИМ соответствует следующая схема увязки (рис. 6). Считаем, что все погрешности и отклонения подчинены закону Гаусса, и для удобства изложения принимаем симметричные отклонения.

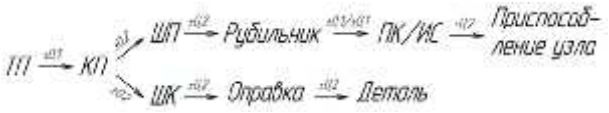

Рис. 6. Структурная схема увязки сборочного приспособления для сборки узла (СП) и контура обводообразующей детали при ПИМ увязки

Рассчитаем составляющие погрешности сборки при ПИМ увязки:

$$\delta_{ï ð} = \pm\sqrt{\sum\left(\frac{\delta_{ÒÏ\ -ï ðèñï}}{2}\right)^2};$$

$$\delta_{ï ð} = \pm\sqrt{0,1^2 \cdot 3 + 0,2^2 \cdot 3} = \pm 0,387 ì ì\ ;$$

$$Ñ_{êî í òóð\ \ ï ð-äåò} = \pm\sqrt{\sum\left(\frac{\delta_{í åñâÿç.\ \ ýòàï î â}}{2}\right)^2};$$

$$Ñ_{êî í òóð\ \ ï ð-äåò} = \pm\sqrt{0,2^2 \cdot 6 + 0,1^2 \cdot 2} = \pm 0,51 ì ì\ ;$$

учитывая, что $\delta_{ï ðî ÷.} = 0,4\delta_{ñá}$, получим:

$$0,6\delta_{ñá} = \pm(0,38 + 0,51);$$

$$\delta_{ñá} = \pm 1,495 ì ì\ .$$

ПРИМ соответствует схема увязки, представленная на рис. 7.

Рассчитаем составляющие погрешности сборки при ПРИМ увязки.

$$\delta_{ï ð} = \pm\sqrt{\sum\left(\frac{\delta_{ÒÏ\ -ï ðèñï}}{2}\right)^2};$$

$$\delta_{ï ð} = \pm\sqrt{0,01^2 \cdot 2 + 0,02^2 \cdot 3 + 0,1^2 \cdot 3 + 0,2^2 \cdot 2} = \pm 0,334 ì ì\ ;$$

$$Ñ_{êî í òóð\ \ ï ð-äåò} = \pm\sqrt{\sum\left(\delta_{í åñâÿç.\ \ ýòàï î â}/2\right)^2};$$

$$Ñ_{êî í òóð\ \ ï ð-äåò} =$$

$$= \pm\sqrt{0,02^2 \cdot 4 + 0,01^2 \cdot 2 + 0,1^2 \cdot 4 + 0,2^2 \cdot 3} = \pm 0,402 ì ì\ ;$$

учитывая, что $\delta_{ï ðî ÷.} = 0,4\delta_{ñá}$, получим

$$0,6\delta_{ñá} = \pm(0,334 + 0,402);\ \ \delta_{ñá} = \pm 1,227 ì ì\ .\ .$$

Таким образом, погрешность сборки узла при ПРИМ увязки меньше чем погрешность сборки при ПИМ на 18%.

ПРИМ с ЧПУ соответствует следующая схема увязки (рис. 8). Погрешность этапа переноса размера СЧПУ-СПП с ЧПУ принимаем равной точности позиционирования штыря СПП с ЧПУ: $\pm 0,01 ì ì$:

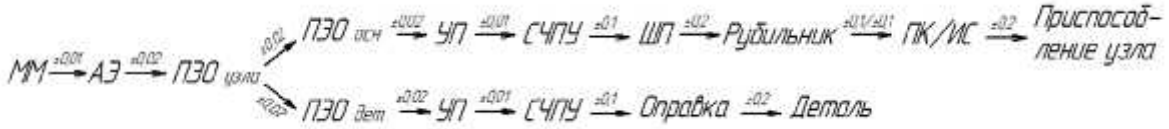

Рис. 7. Структурная схема увязки СП и контура обводной детали при ПРИМ увязки

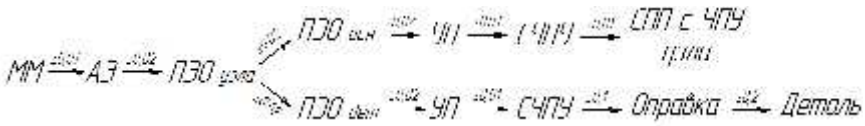

Рис. 8. Структурная схема увязки приспособления узла и обводной детали при ПРИМ с ЧПУ увязки

Рассчитаем составляющие погрешности сборки при ПРИМ с ЧПУ увязки.

$$\delta_{ï ð} = \pm\sqrt{\sum\left(\frac{\delta_{ÒÏ\ -ï ðèñï}}{2}\right)^2};$$

$$\delta_{ï ð} = \pm\sqrt{0,01^2 \cdot 3 + 0,02^2 \cdot 3} = \pm 0,039 ì ì\ ;$$

$$Ñ_{êî í òóð\ \ ï ð-äåò} = \pm\sqrt{\sum\left(\frac{\delta_{í åñâÿç.\ \ ýòàï î â}}{2}\right)^2};$$

$$Ñ_{êî í òóð\ \ ï ð-äåò} =$$

$$= \pm\sqrt{0,02^2 \cdot 4 + 0,01^2 \cdot 3 + 0,1^2 + 0,2^2} = \pm 0,228 ì ì\ ;$$

учитывая, что $\delta_{ï ðî ÷.} = 0,4\delta_{ñá}$, получим:

$$0,6\delta_{ñá} = \pm(0,039 + 0,228);$$

$$\delta_{ñá} = \pm 0,445 ì ì\ .$$

Таким образом, погрешность сборки узла при ПРИМ с применением СПП с ЧПУ по сравнению с традиционным ПРИМ увязки меньше на 63,7%, а по сравнению с ПИМ – меньше на 70%.

Заключение

Экспериментальные исследования и проведенные точностные расчеты подтвердили уменьшение погрешность сборки плоских авиационных узлов при использовании специализируемых переналаживаемых приспособлений с ЧПУ на 70% в сравнение со сборкой в специальных сборочных приспособлениях традиционной конструкции.

Список литературы

1. Воронько В.В. Автоматизация и механизация технологии сборки авиационных конструкций / В.В. Воронько // Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки»: тези доп. – Х., 2010. – С. 65.

2. Метод автоматизированной конвейерной сборки планера самолета [Текст] / В.С. Кривцов, Ю.А. Воробьев, В.В. Воронько, В.Е. Зайцев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 55. – Х., 2012. – С. 5 – 13.

3. Воронько, В.В. Пути оптимизации технологических процессов сборки летательных аппаратов [Текст] / В.В. Воронько, Ю.А. Лебедева, О.В. Григоренко // Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки»: тези доп. – Х., 2012. – С. 65.

4. Воронько, В.В. Формализация и алгоритмизация процессов сборки в самолетостроении [Текст] / В.В. Воронько, О.К. Погудина // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 57. – Х., 2012. – С. 86 – 92.

Поступила в редакцию 04.06.2013

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

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ СКЛАДАННЯ В СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНИХ СКЛАДАЛЬНИХ ПРИСТОСУВАННЯХ З ЧПУ

В.В. Воронько, Ю.А. Воробйов, Ю.В. Дяченко, О.С. Профатілова

Стаття присвячена питанням підвищення точності складання плоских вузлів авіаційних конструкцій, автоматизації складальних робіт і робіт з технологічної підготовки виробництва за рахунок використання методу «складання за віртуальними базами» із застосуванням спеціалізованих переналагоджуваних пристроїв з ЧПУ натомість спеціальних складальних пристроїв або спеціалізованих переналагоджуваних складальних пристроїв традиційної конструкції. Наведено результати виконаних експериментів і проведених розрахунків точності складання при різних методах забезпечення взаємозамінності.

Ключові слова: *складання , плоский вузол, спеціалізоване переналагоджуваний складальний пристрої, похибка складання, метод ув'язки.*

EXPERIMENTAL STUDIES IN SPECIALIZED PRECISION ASSEMBLY JIGS READJUSTED CNC

V.V. Voronko, Yu.A. Vorobyov, Yu.V. Djatchenko, A.S. Profatilova

The Article is devoted to improve the accuracy of flat knots assembly of aircraft structures, assembly automation works and technological preparation of production by using the method of "Build-to-virtual bases" with the use of specialized devices readjusted CNC instead of special assembly fixtures or specialized readjusted assembly devices of traditional construction. The results of experiments performed and the accuracy of the calculations for various assembly methods to ensure interchangeability.

Keywords: *assembly, flat knot, specialized reconfigurable jig, assembly error, method of linking.*