

УДК 629.735.33.023.8.018.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ-СЖАТИИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УГЛЕПЛАСТИКА

Ю.А. Воробьев, С.Г. Кушнаренко, канд. техн. наук

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

Изложены результаты экспериментальных исследований статической прочности заклепочных соединений образцов из углепластика, выполненных различными способами клепки; влияние на прочность радиального натяга в соединении.

\* \* \*

Викладено результати експериментальних досліджень статичної міцності заклепувальних з'єднань зразків із вуглепластику, виконаних різними способами клепання; вплив на міцність радіального натягу в з'єднанні.

\* \* \*

The results of experimental researches of a static strength of riveting of junctions are stated is exemplar from carboncomposite, executed by various clappmethods; influence to strength characteristics of radial tightness in connection.

Клепка авиационных конструкций из композиционных материалов – углепластиков (КМУ) высокопрочными титановыми заклепками с шайбой должна обеспечивать регламентированные техническими требованиями и условиями эксплуатации функциональные и потребительские свойства ЛА.

К такого рода свойствам специалисты относят, прежде всего, повышение статической прочности и ресурса ЛА, снижение массы конструкции, снижение трудоемкости выполнения соединений.

Исследования циклической долговечности заклепочных соединений КМУ, проведенные авторами [1, 2], показали существенные преимущества импульсной клепки по сравнению с многоударной и прессовой при условии выбора оптимальных параметров технологического процесса и инструмента. Основными факторами, определяющими свойства заклепочных соединений, являются величина радиального натяга и характер его распределения по толщине пакета. В настоящее время специалисты расходятся во мнениях об оптимальных величинах радиальных натягов в соединениях из КМУ, обеспечивающих максимальные значения статической прочности. В [3] установлен оптимальный натяг

3 %, в других же работах [4, 5] рекомендуют натяг 0,7...1,5 %, заклепки типа Stahl-Hi-Loks устанавливают с натягом 0,08...2,25 % [6], предпочитая минимальные значения.

Целью работы было исследование влияния способа клепки и величины радиального натяга в соединении на его статическую прочность.

Для этого были проведены испытания на растяжение-сжатие следующих типов образцов заклепочных соединений (рис. 1):

1. Тип 1 - заполненное ненагруженное отверстие (безмоментное соединение  $\varepsilon_B/\varepsilon_{AX}=0$ , отсутствуют напряжения смятия и среза  $F_{L0}/F=0$ ).
2. Тип 2 - двухсрезное симметричное четырехрядное с одной заклепкой в ряду (безмоментное соединение  $\varepsilon_B/\varepsilon_{AX}=0$ , существуют напряжения смятия и среза  $F_{L0}/F=0,54$ );
3. Тип 3 - односрезное несимметричное соединение с одной заклепкой (вторичные напряжения изгиба  $\varepsilon_B/\varepsilon_{AX}=0,35$ , существуют напряжения смятия и среза  $F_{L0}/F=0,25$ ).

Отверстия под заклепки выполняли в два приема: сверление с охлаждением водой на стацио-

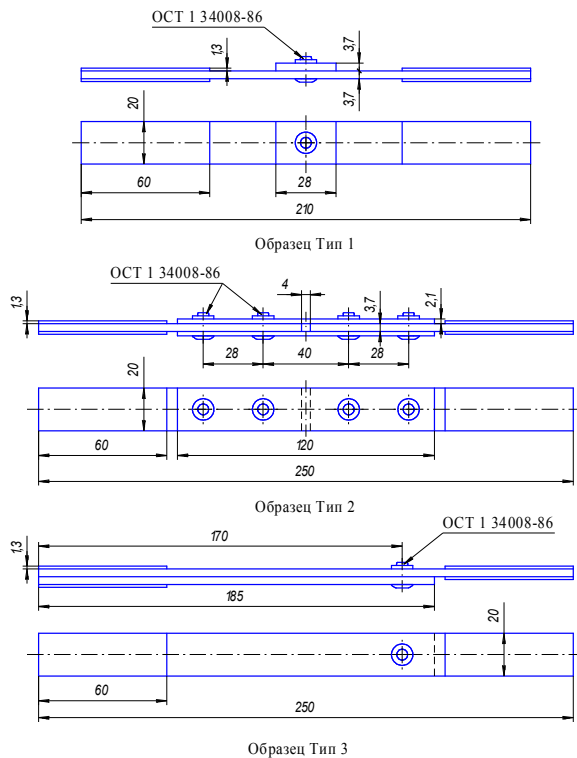


Рис. 1. Типы образцов заклепочных соединений

нарном сверлильном станке с частотой вращения  $65 \text{ с}^{-1}$  с последующим развертыванием вручную до размера  $d_o=4,1H9$  или  $d_o=3,1H9$  соответственно.

Клепку выполняли на прессе мод. КП-204М; многоударным молотком мод. КМП-25 (метод клепки – прямой, поддержка с плоской рабочей частью массой  $m_n=3d$ , где  $d$  – диаметр заклепки, мм,  $m_n$  – масса поддержки, кг [7]); пневмоимпульсным клепальным молотком мод. МПИ-90М (поддержки с плоской рабочей частью и с лункой по форме закладной головки заклепки массой  $m_n=d$ ; обжимки с плоской рабочей частью и со сферическими лунками  $R_{сф}=d$ ,  $h=0,3d$  и  $R_{сф}=1,25d$ ,  $h=0,22d$  при  $d_{max}=1,42d$  массой 0,14 кг).

Для сравнения были испытаны пластины из исходного материала и образцы с концентратором напряжений в виде отверстия диаметром  $d_o^{пл} = d_o$ .

Эксперимент выполняли на электромеханической испытательной машине Schenk TREBEL RM 250 (рис. 2), настройку и контроль параметров осуществляли со стойки управления Schenk TREBEL M 1600, запись

и обработку результатов – с помощью ПЭВМ Atari SM 124.

Нагружение образцов осуществляли с постоянной скоростью 1 мм/мин. Замер перемещений выполняли с помощью стандартных приспособлений на измерительной базе 50 мм. Так как разрушение образцов Тип 2 возможно по двум различным местам, то для съема перемещений в этом случае использовали два приспособления и во внимание принимали показания того, который располагался в зоне разрушения.

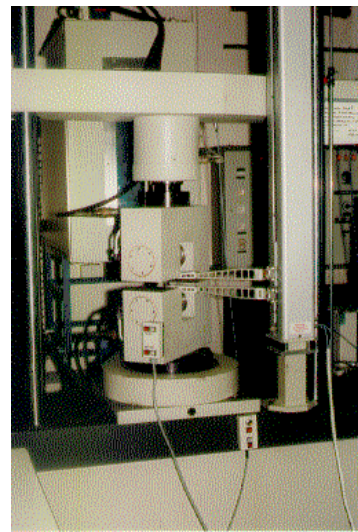


Рис. 2. Электромеханическая испытательная машина

При испытаниях на сжатие образцы нагружали только касательными усилиями, как это регламентировано ASTM (схема 1-3 [8]). Для исключения влияния продольного изгиба при растяжении образцов Тип 3 и потери устойчивости при сжатии всех типов клепаных образцов использовали приспособления, предотвращающие выпучивание боковой поверхности образца, но не стесняющие деформации в его плоскости. Поддерживающие приспособления были изготовлены из алюминиевого сплава и со стороны образца для уменьшения трения покрыты слоем тефлона.

В результате сравнения напряжений разрушения пластин без концентратора напряжений и напряжений разрушения остальных образцов определяли коэффициент эффективности соединения

$$k_{эф} = \frac{\sigma_{разр}^{обр}}{\sigma_{разр}^{пл}}$$

Найденные коэффициенты использовали для сравнения эффективности различных способов клепки.

Результаты эксперимента на растяжение-сжатие для пластин и клепаных образцов представлены в таблице. Напряжения разрушения рассчитывали для полного сечения образца.

Тип образца и способ клепки		Напряжения разрушения $\bar{\sigma}_b$ , МПа	Коэффициент эффективности соединения $\bar{K}_{эф}$
<b>Растяжение</b>			
Пластина без концентратора напряжений		1057,01	1,00
Пластина с концентратором в виде отверстия $d_o^{пл} = d$		629,57	0,60
Тип 1	прессовая клепка	734,97	0,69
	многоударная клепка	643,45	0,61
	импульсная клепка плоской обжимкой	749,58	0,71
	импульсная клепка обжимкой с лункой $R_{сф}=d$	690,05	0,65
	импульсная клепка обжимкой с лункой $R_{сф}=1,25d$	744,15	0,70
	Stahl-Hi-Loks CP H 802 A-06-03	367,00	0,43
	Тип 2	импульсная клепка обжимкой с лункой $R_{сф}=1,25d$	615,68
Тип 3	импульсная клепка обжимкой с лункой $R_{сф}=1,25d$	707,23	0,67
<b>Сжатие</b>			
Пластина без концентратора напряжений		-1078,26	1,00
Пластина с концентратором в виде отверстия $d_o^{пл} = d$		-964,52	0,62
Тип 1	прессовая клепка	-964,52	0,89
	многоударная клепка	-845,67	0,78
	импульсная клепка плоской обжимкой	-992,43	0,92
	импульсная клепка обжимкой с лункой $R_{сф}=d$	-840,95	0,78
	импульсная клепка обжимкой с лункой $R_{сф}=1,25d$	-983,36	0,91
	Stahl-Hi-Loks CP H 802 A-06-03*	-660,00	0,76
	Тип 2	импульсная клепка обжимкой с лункой $R_{сф}=1,25d$	-785,41
Тип 3	импульсная клепка обжимкой с лункой $R_{сф}=1,25d$	-720,96	0,67

Из представленной таблицы видно следующее:

- Пластина с концентратором и клепаные образцы обладают меньшей прочностью по сравнению с пластиной без концентратора. Концентратор напряжений в виде отверстия  $d_o^{пл} = d_o$  снижает прочность образца до  $0,6\sigma_b^{пл}$  при растяжении и  $0,62\sigma_b^{пл}$  при сжатии (по [9] эти значения соответственно равны  $0,69\sigma_b^{пл}$  и  $0,72\sigma_b^{пл}$ ), где  $\sigma_b^{пл}$  – предел прочности пластины без концентратора напряжений.
- Максимальную статическую прочность имеют образцы, выполненные импульсной клепкой плоской обжимкой (коэффициент эффективности соединения при растяжении и сжатии – соответственно, 0,71 и 0,92) и обжимкой со сферической лункой при  $R_{сф}=1,25d$  (коэффициент эффективности соединения - соответственно 0,70 и 0,91); минимальную (коэффициент эффективности соединения - соответственно 0,61 и 0,78) – образцы, клепаные многоударным молотком. Импульсная клепка обжимкой со сферической лункой при  $R_{сф}=d$  также показала низкие результаты, что можно объяснить высокими значениями натягов в соединении и, как следствие, наличием внутренних расслоений в композите.
- Минимальный разброс экспериментальных значений прочности имеют клепаные образцы, выполненные на прессе (среднеквадратичные отклонения при растяжении и сжатии составили соответственно 5,42 и 5,51 % от среднего значения прочности); далее идет импульсная клепка, и худшие результаты - у многоударной клепки (6,62 и 8,92 % соответственно). Это также подтверждает высокую стабильность параметров соединения при импульсной клепке. Несколько более высокую повторяемость результатов при импульсной клепке обжимкой со сферической лункой, чем с плоской рабочей частью, можно объяснить особенностями стесненных условий деформирования, характеризующихся меньшей чувствительностью к разбросу энергии

деформирования.

Виды разрушения были характерными для каждого типа образцов и вида испытания.

На рис. 3 показаны графики «напряжение-деформация» для различных типов образцов, выполненных импульсной клепкой - обжимкой со сферической лункой  $R_{сф}=1,25d$ , приведены численные значения напряжений и деформаций при разрушении. Для сравнения показана кривая для пластины без концентратора напряжений.

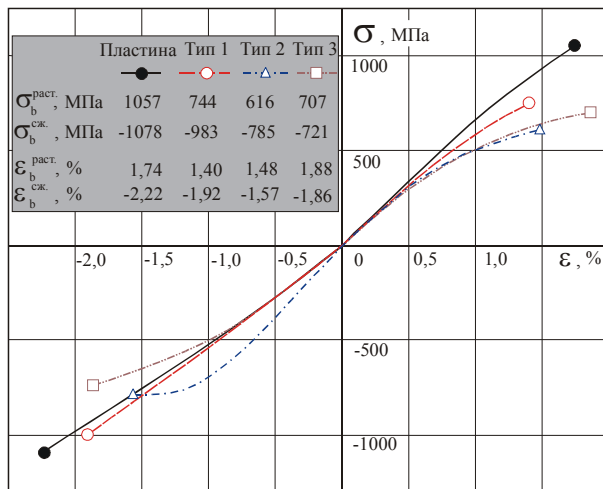


Рис. 3. Графики «напряжение-деформация» для различных типов образцов, выполненных импульсной клепкой - обжимкой со сферической лункой  $R_{сф}=d$

Из графиков видно:

- Пластины и клепаные образцы Тип 3 имеют практически равные напряжения разрушения при растяжении и сжатии (для пластин с концентратором средние значения  $\sigma_b^{сж} = 1,06\sigma_b^{раст}$ , для пластин без концентратора и клепаных образцов Тип 3 -  $\sigma_b^{сж} = 1,02\sigma_b^{раст}$ ), в то время как для клепаных образцов Тип 1 и Тип 2 это отличие составляет 22...32 % (для образцов с Stahl-Hi-Loks – 80 % [6, 9]). Это объясняется существенным снижением при сжатии касательных напряжений в зоне отверстия вследствие натяга в соединении.
- Для большинства образцов Тип 3 на диаграмме «напряжение-деформация» в виде скачка или плоской площадки четко выражено «начальное разрушение». При разрушении напряжения сжатия в дей-

ствительности превосходят напряжения «начального разрушения» на 20-40 %. С учетом этого на рис. 3 для образцов Тип 3 показаны данные «начального разрушения», в случае его отсутствия – данные момента полного разрушения образца (на обобщенной диаграмме скачки не показаны).

- Диаграммы для пластины и образцов Тип 1 имеют практически линейный характер и наиболее близки по крутизне. Для образцов Тип 2 вблизи предела прочности при сжатии характерен существенный рост деформации (нелинейность), объясняемый выявленной при осмотре образцов после разрушения конусонизацией отверстия. При этом из-за высоких значений передаваемых через крепежный элемент усилий  $F_{Li}/F=0,54$  два из пяти образцов разрушились от смятия стенок отверстия. Существенная нелинейность кривой «напряжение-деформация» образцов Тип 3 объясняется значительным перекосом заклепки.

На рис. 4 показаны экспериментальные данные (пункты) и аппроксимирующие зависимости предела прочности при растяжении клепаных образцов Тип 1 от натяга в соединении  $\sigma_b^{раст} = f(\Delta)$  для различных способов клепки. Аппроксимацию проводили по методу наименьших квадратов. Анализ результатов статистической обработки свидетельствует о достаточности выборок для достоверности полученных данных, так как для всех способов клепки и типов образцов показатель точности  $P \leq 5\%$ .

Зависимость, полученная для импульсной клепки, имеет максимальное значение  $\sigma_b^{раст} = 766,1$  МПа, которое соответствует радиальному натягу в соединении  $\Delta=1,14\%$ , что совпадает с оптимальными значениями натягов, установленными другими авторами [4, 5].

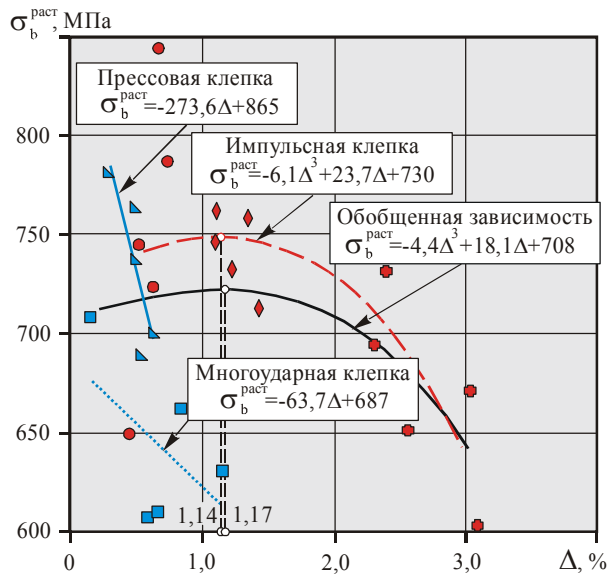


Рис. 4. Зависимость статической прочности при растяжении  $\sigma_b^{\text{раст}}$  заклепочных соединений от натяга  $\Delta$  и способа клепки

### Заключение

Приведенные результаты показывают, что импульсная клепка высокопрочных заклепочных соединений способна обеспечить максимальную статическую прочность авиационных конструкций из углепластика по сравнению с пресовой и многоударной клепкой, зависящую от условий деформирования заклепок. Оптимальная величина радиального натяга в соединении составляет 1, 14 %.

### Литература

1. Кушнарченко С.Г., Воробьев Ю.А. Исследование технологии импульсной клепки авиаконструкций из КМУ высокопрочными заклепками // Труды второй международной конференции «Новые технологии в машиностроении». – Рыбачье, Харьк. авиац. ин-т, 1993. – С. 153-156.
2. Кушнарченко С.Г., Чистяк В.Г., Воробьев Ю.А. Выполнение соединений КМУ титановыми заклепками с использованием пневмоимпульсных клепальных молотков // Тез. докл. отраслевого научно-технического семинара «Совершенствование

процессов выполнения высокоресурсных заклепочных соединений в конструкциях из легких, жаропрочных сплавов и композиционных материалов». Самара, 15-17 октября 1991. – С. 30-31.

3. Разработка рекомендаций по выполнению высокоресурсных заклепочных соединений в углепластиках заклепками из титанового сплава. Технический отчет 2.8841.68. НИАТ. 1986.-46 с.

4. Воронов А.В. Исследование технологии и механизма формообразования заклепочных соединений, выполненных высокоскоростным магнитно-импульсным способом в конструкциях ЛА из КМ: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. - М.: МАИ, 1981.-22 с.

5. Воробей В.В., Сироткин О.С. Соединения конструкций из КМ. -Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. 1985.-168 с.

6. Schwingfestigkeituntersuchungen an Fügungen in Faserverbundbauweise. Luftfahrttechnisches Handbuch, Faserverband-Leichtbau, VB 23 200-10.21.07. 1982.

7. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. - 516 с.

8. Композиционные материалы: Справочник/ В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского М.: Машиностроение, 1990.-512 с.

9. Schwingfestigkeituntersuchungen an Fügungen in Faserverbundbauweise. Luftfahrttechnisches Handbuch, Faserverband-Leichtbau, VB 23 200-10.21.07.1982.

Поступила в редакцию 18.03.03

**Рецензенты:** д-р техн. наук, профессор Бетин А.В., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков; главный конструктор Яшин С.А., НИИ ПФМ, г. Харьков.