

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-

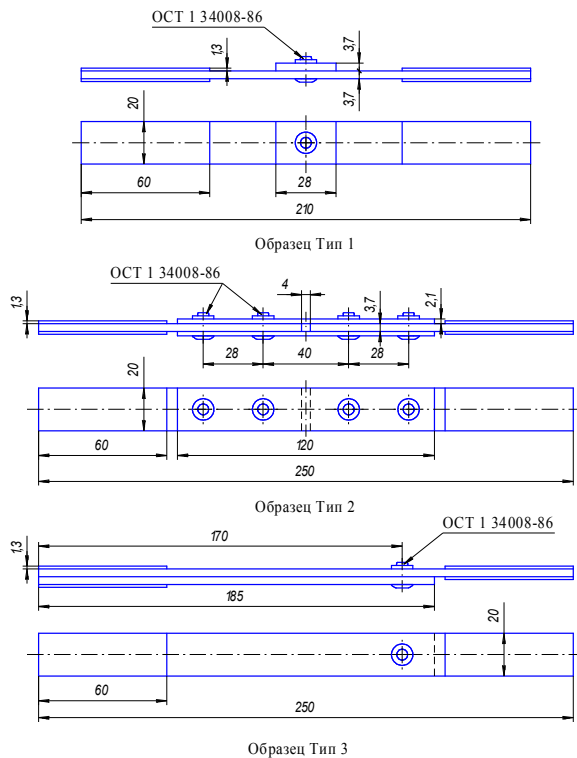


Рис. 1. Типы образцов заклепочных соединений

нарном сверлильном станке с частотой вращения 65 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.

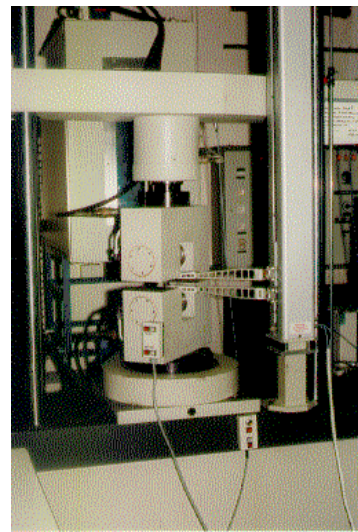


Рис. 2. Электромеханическая испытательная машина

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		Напряже- ние разру- шения $\bar{\sigma}_b$, МПа	Коэффи- циент эффектив- ности соединения $\bar{K}_{эф}$
Растяжение			
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
Сжатие			
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.

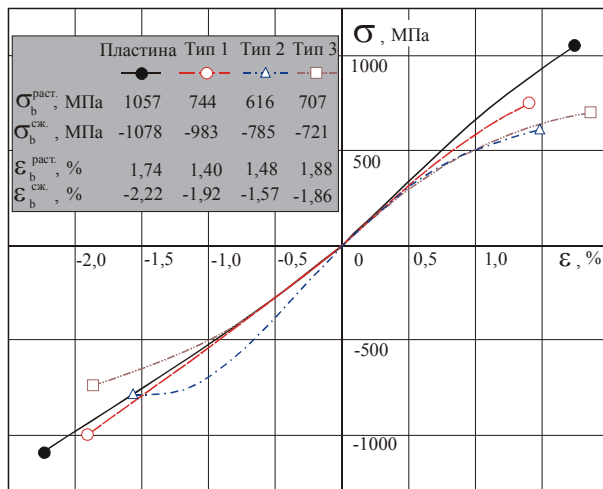


Рис. 3. Графики «напряжение-деформация» для различных типов образцов, выполненных импульсной клепкой - обжимкой со сферической лункой $R_{сф}=d$

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].

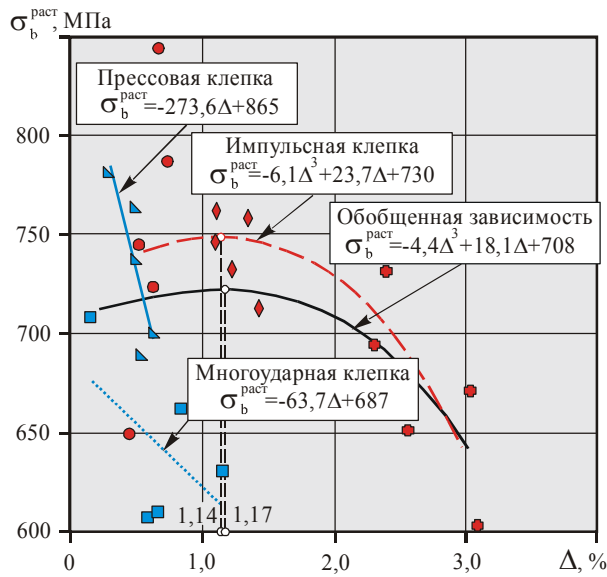


Рис. 4. Зависимость статической прочности при растяжении $\sigma_b^{\text{раст}}$ заклепочных соединений от натяга Δ и способа клепки

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.