

УДК 629.735.33.023.8.018.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

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

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

Изложены результаты экспериментальных исследований долговечности заклепочных соединений образцов из углепластика, выполненных различными способами клепки; влияние на долговечность температуры саморазогрева образцов.

\* \* \*

Викладено результати експериментальних досліджень довговічності заклепочних з'єднань зразків із вуглепластика, виконаних різними способами клепання; вплив на довговічність температури саморозігріву зразків.

\* \* \*

The results of experimental researches of durability riveting of junctions are stated is exemplar from carboncomposite, executed by various clapmethods; influence to durability of temperature self-heat is exemplar are expounded.

К наиболее важным требованиям, предъявляемым к конструкциям современных летательных аппаратов, относят минимизацию массы, увеличение жесткости и прочности, эксплуатационного ресурса и надежности. Этому комплексу требований в первую очередь удовлетворяют конструкции, изготовленные из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Из всех армирующих материалов углеродные волокна являются одним из наиболее перспективных для упрочнения полимерных матриц ввиду высоких значений удельных прочности и жесткости.

В настоящее время наиболее широко распространены резьбовые, клеевые, заклепочные и шпильно-болтовые соединения конструкций из ПКМ. Основной особенностью процесса образования заклепочных соединений деталей из углепластиков (КМУ) считают возможность разрушения композиции в процессе клепки. В силу малого относительного удлинения при разрушении, низкого порога ударпрочности допустимые деформации при клепке КМУ имеют предел, который в несколько раз меньше, чем у легких сплавов и сталей. В то же время для обеспечения необходимой жесткости соединения и равномерной загрузки всех силовых то-

чек натяг необходим.

Для обеспечения прочности соединений в условиях нагрева и электрохимической коррозии применяют заклепки из коррозионностойкой стали или сплавов титана, что усложняет задачу ограничения деформаций и напряжений при клепке КМУ.

До настоящего времени у специалистов нет единого мнения об оптимальных величинах радиальных натягов в заклепочных соединениях КМУ, обеспечивающих максимальные значения статической прочности и усталостной долговечности. В [1] для таких конструкций установлен оптимальный натяг 3 %, в других работах [2, 3] эту величину считают критической и рекомендуют натяг 0,7...1,5 %. В зарубежных же изделиях заклепки типа Stahl-Ni-Loks устанавливают с натягом 0,08...2,25 %, предпочитая минимальные значения [4].

В этой связи большой интерес представляет исследование влияния натяга в соединении на его циклическую долговечность при различных способах клепки. Были проведены усталостные испытания соединений КМУ заклепками ОСТ 1 34008-86 диаметром  $d=3; 4$  мм из титанового сплава ВТ16 с шайбой ОСТ 1 34503-86. Соединения выполняли импульсной (плоская обжимка, обжимка со сфери-

ческой лункой  $R_{сф}=d$  и  $R_{сф}=1,25d$ ; поддержка с плоской рабочей частью), многоударной и прессовой клепкой. Для сравнения были испытаны пластины из исходного материала и образцы с концентратором напряжений в виде отверстия диаметром  $d_0=d$ .

Исследования проводили на образцах, изготовленных из препрега CE 1003-255-40/1071024 фирмы SIGRI GmbH с одной из наиболее распространенных в авиационных конструкциях схемой армирования  $[(0_2 / \pm 45)_2 / \bar{0}]_s$ .

Из всего разнообразия образцов заклепочных соединений для исследования были выбраны:

- Тип 1 – заполненное незагруженное отверстие;
- Тип 2 – двухсрезное симметричное четырехрядное соединение с одной заклепкой в ряду;
- Тип 3 – односрезное несимметричное соединение с одной заклепкой.

Отверстия в пакете выполняли в два перехода: сверлом  $\varnothing 3,8$  мм, затем разверткой  $\varnothing 4,1$  Н9.

Исследования проводили на аттестованной испытательной машине с силовым цилиндром мод. SCHENK 100kN PM 100  $R_n$  (рис. 1,а), управление и контроль параметров осуществляли со стойки управления мод. SCHENK MP 312 (рис.1,б).

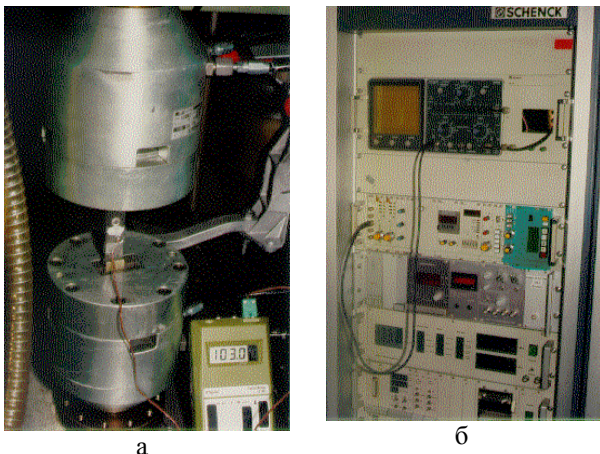


Рис. 1. Схема проведения эксперимента:  
а – испытательная машина; б – стойка управления

Частота нагружения составляла 20 Гц для всех типов образцов, образцы Тип 1 дополнительно испытывали при частотах в 2,5...5 Гц.

Из полученных результатов видно следующее:

- Долговечность клепаных образцов выше долговечности пластин с концентратором напряжений, но ниже долговечности пластин без концентратора.
- На базовом числе циклов (1 млн. циклов) разрушения в образцах происходят при следующих уровнях нагружения от  $P_{стат}$ : пластина с концентратором – 75 %; пластина без концентратора и импульсная клепка (обжимка со сферической лункой  $R_{сф}=d$ ) – 80 %; прессовая клепка – 85 %; импульсная клепка (плоская обжимка и со сферической лункой  $R_{сф}=1,25d$ ) и многоударная клепка – 95 %. Однако для реальных конструкций и условий эксплуатации уровни усталостного нагружения, как правило, не превышают 60 % от статического предела прочности. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о больших резервах соединений КМ при циклическом нагружении.
- По абсолютным величинам наиболее высокие напряжения усталостного разрушения на базовом числе циклов имеют пластины без концентратора напряжений – 838 Н/мм<sup>2</sup>. Для образцов, выполненных импульсной клепкой плоской обжимкой, напряжения усталостного разрушения составляют 706 Н/мм<sup>2</sup>; для импульсной клепки обжимкой со сферической лункой  $R_{сф}=1,25d$  – 697 Н/мм<sup>2</sup> и  $R_{сф}=d$  – 550 Н/мм<sup>2</sup>; многоударной клепки – 608 Н/мм<sup>2</sup>; прессовой клепки – 528 Н/мм<sup>2</sup>. Минимальные значения характерны для пластин с концентратором напряжений в виде отверстия – 470 Н/мм<sup>2</sup>.

На рис. 2 показаны экспериментальные значения и аппроксимирующие зависимости долговечности клепаных соединений от способа клепки и натяга в соединении  $\lg N=f(\Delta)$ .

Для импульсной клепки и обобщенной зависимости существуют оптимальные значения натягов, обеспечивающие максимальную долговечность соединений: для импульсной клепки  $\Delta_{опт}=1,16$  %; обобщенная кривая имеет максимум при натяге  $\Delta_{опт}=1,27$  %.

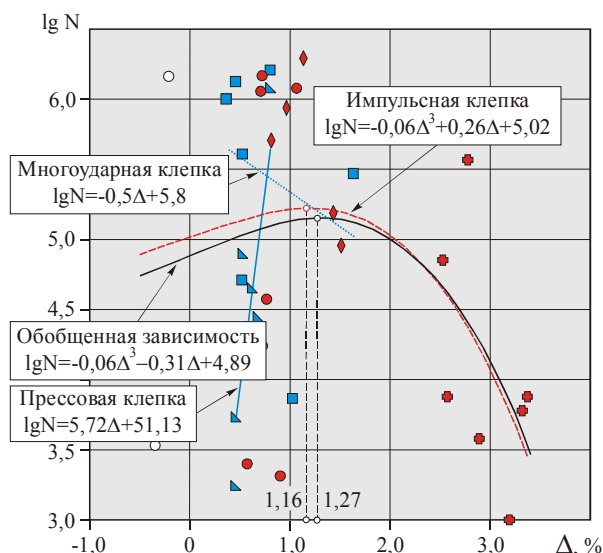


Рис. 2. Залежність циклічної довговечності  $\lg N$  заклепочних з'єдинень від натяга  $\Delta$  і способу клепок

Полученные результаты позволяют рекомендовать импульсную клепку обжимкой со сферической лункой  $R_{сф}=1,4d$  в качестве клепки, обеспечивающей максимальную циклическую долговечность при качественном выполнении соединений. Увеличение натягов при импульсной клепке обжимкой со сферической лункой  $R_{сф}=d$  до  $\Delta=2,5-2,8\%$  требует увеличения энергии удара и сопровождается, как правило, повреждением композита, что приводит к снижению усталостных характеристик соединений. Существенное снижение напряжений разрушения при циклическом нагружении по сравнению со статикой для пресовой клепки объясняется наличием зазора под закладной головкой заклепки и меньшими в сравнении с многоударной клепкой усилиями сжатия пакета.

При проведении предварительных исследований было отмечено значительное увеличение температуры образца в процессе усталостного нагружения (явление саморазогрева), что по данным [5] является причиной резкого ухудшения прочностных и упругих характеристик материала соединяемых деталей. В целях установления параметров, определяющих температуру саморазогрева  $t^{\circ}\text{C}$ , на образцы в непосредственной близости к закладной головке заклепки наклеивали датчик Tastoherm. D700 NiCr-NiAl (см. рис. 1,а); периодически проводили съем

показаний прибора с фиксацией уровня и числа циклов нагружения вплоть до разрушения образца. После построения графика  $t^{\circ}=f(N)$  определяли температуру при числе циклов  $N=0,9N_{разр}$ . Результаты эксперимента для образцов Тип 1 и Тип 2 при коэффициенте асимметрии цикла  $R=0,1$  показаны на рис. 3.

Из графиков видно, что наиболее существенное влияние на температуру саморазогрева образца оказывают следующие параметры:

- Амплитуда напряжений: при увеличении амплитуды напряжений повышается температура образца.
- Частота нагружения: для образцов Тип 1 при увеличении частоты нагружения с 5 до 20 Гц при одинаковом уровне нагружения температура возросла с  $43\dots 53^{\circ}\text{C}$  до  $78\dots 103^{\circ}\text{C}$ , т.е. на  $80\dots 110\%$ .
- Наличие принудительного охлаждения: применение вентилятора для непрерывного охлаждения приводит к снижению температуры на  $65\dots 77\%$  для обоих типов образцов.
- Тип образца: при меньших значениях амплитуды напряжений образцы Тип 2 имеют большую температуру ввиду своих конструктивных особенностей.

При этом рост температуры образца практически не зависит от значений верхнего напряжения (соответственно коэффициента асимметрии цикла):

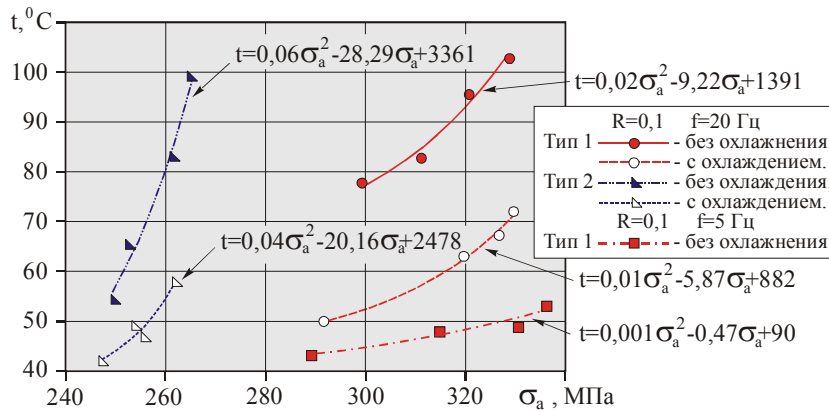


Рис. 3. Зависимость температуры саморазогрева образцов  $t$  от условий циклического нагружения  $f$  и  $\sigma_a$ , наличия охлаждения для различных типов образцов

графики  $t=f(\sigma_a)$  носит линейный или близкий к линейному характер.

В ходе экспериментов было установлено, что явление саморазогрева существенно снижает усталостную прочность соединений КМУ (более чем в пять раз), ухудшает стабильность результатов (для охлаждаемых образцов Тип 1 коэффициент вариации числа циклов до разрушения составил 4,5 %, а для неохлаждаемых – 80,2 %).

### Заключение

Проведенные исследования показывают, что заклепочные соединения КМУ обладают высокими усталостными характеристиками. На базовом числе циклов разрушение образцов происходит при уровне нагружения в 80...95 % от  $R_{стат.}$  Результаты экспериментов позволяют рекомендовать в качестве способа, обеспечивающего максимальную долговечность заклепочных соединений конструкций из КМУ, импульсную клепку обжимкой со сферической лункой  $R_{сф}=1,4d$ . Саморазогрев образцов в результате циклического нагружения более чем в пять раз снижает долговечность заклепочных соединений КМУ, существенно ухудшая стабильность параметров соединений.

### Литература

1. Разработка рекомендаций по выполнению высокоресурсных заклепочных соединений в углепластиках заклепками из титанового сплава. Технический отчет 2.8841.68. НИАТ. 1986.-46 с.
2. Воронов А.В. Исследование технологии и механизма формообразования заклепочных соединений, выполненных высокоскоростным магнитно-импульсным способом в конструкциях ЛА из КМ: Автореферат дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. -М.: МАИ, 1981.-22 с.
3. Воробей В.В., Сироткин О.С. Соединения конструкций из КМ. -Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985.-168 с.
4. Schwingfestigkeituntersuchungen an Fügungen in Faserverbundbauweise. Luftfahrttechnisches Handbuch, Faserverband-Leichtbau, VB 23 200-10.21.07. 1982.
5. Березин А.В. Влияние повреждений на деформационные и прочностные характеристики твердых тел. - М.: Наука, 1990.-126 с.

Поступила в редакцию 18.03.03

**Рецензенты:** канд. техн. наук, научный сотрудник Гонтаренко А.П., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков; канд. техн. наук, руководитель информационной службы Заугольников Н.Л., НПІ «Интеравиасервис», г. Харьков.