

УДК 629.735.33.001.63:681.3.01

А. С. ДАНОВ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СПЛАВА Д16АТ ТИТАНОВЫМИ ЗАКЛЁПКАМИ ИЗ ВТ 16 С ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ СТЕСНЁННОЙ ОСАДКЕ

Проведены статические испытания на раздачу, прочности на отрыв и срез заклёпок из титанового сплава ВТ 16. Определено влияние механических характеристик и конструктивных форм заклёпок из ВТ 16 на качество соединений из Д16АТ. Применена стеснённая осадка, реализованная конструктивно-технологическими средствами: заполненное поднутрение, шайба, втулка, пуансон. Определены рациональные параметры поднутрения в стержне заклёпки, параметры шайбы, жёсткость соединений и усталостные испытания на осевые нагрузки. Определено влияние технологических отклонений по усилию клёпки на качество соединений. Разработаны рекомендации по снижению чрезмерной раздачи соединений титановыми заклёпками.

Ключевые слова: статические испытания, титановые заклёпки, поднутрение, утонение, запрессовка, осевая циклическая нагрузка, раздача, стеснённая осадка.

Введение

Заклепки из титанового сплава ВТ 16 позволяют заменять стальные болтовые соединения, и потому их применение уменьшает вес и повышает технологичность соединений авиаконструкций [1, 2].

Заклёпки выбраны идентичными болтами и болт-заклепкам из сплава ВТ 16 для соединений с радиальным натягом. Различие состояло в форме хвостовика под клепку, и предполагало наличие поднутрения в стержне, а также ограничительного элемента. Также исследовались: форма замыкающей головки; форма и размеры поднутрения в хвостовике замыкающей, а также для закладной головок; конструктивные и технологические способы ограничения деформации в соединении; способ устранения трещинообразования при формировании замыкающей головки.

1. Описание эксперимента

Исследована возможность применения в соединениях из Д16АТ заклёпок из титанового сплава ВТ 16, полученных доработкой болтов из этого же сплава ВТ 16, а также заклёпки из сплава ВТ 30.

Проведены эксперименты по определению: механических характеристик материала, на раздачу, среза жёсткости соединений; усилию отрыва головок заклёпок; усталостные испытания при действии осевых циклических нагрузок. Исследованы технологические варианты снижения радиальной раздачи

под замыкающей головкой титановых заклёпок.

Для оценки качества соединений, полученных на основе разработанного крепежа, были проведены статистические испытания по определению усилий отрыва головок, среза и исследованию раздачи заклёпки в пакете, а также усталостные испытания на циклическую осевую силу отрыва.

2. Влияние механических характеристик материала и конструктивных форм заклёпки на качество и раздачу соединений из сплава Д16АТ

В СНГ налажено производство высадкой резьбового крепежа из сплава ВТ 16 диаметрами до 8 мм. Сплав ВТ 16 достаточно пластичный и имеет предел прочности при растяжении порядка (900...1100) МПа в отожжённом и до 1250 МПа в закаленном и состаренном состоянии.

В качестве образцов для исследования раздачи были выточены из материала Д16АТ цилиндрические бобышки диаметром $D = 25$ мм и высотой $H=16$ мм. В них сверлилось и развертывалось отверстие до диаметра 7,95 Н9, соответствующего предварительной посадке 1% крепежа. Также обрезалась резьбовая часть болта, выполнялся заходный участок и базовое поднутрение. В образцах 3 и 4 делалось дополнительное (ступенчатое) поднутрение с параметрами 2,0x6,0; 2,5x6,0; 3x6,0 и 3,5x6,0 мм. В образцах №5 и 6 поднутрение имело параметры 4,0x14,0 мм и 4,0x9,0 мм. В образце 8 было выполнено только базовое поднутрение, в образце № 9

поднутрение: $4,0 \times 8,0$ мм было со стороны закладной головки, в образце 10 поднутрение $d_0 = 3,5$ мм выполнялось сквозным.

Для оценки влияния механических характеристик титановых сплавов на расклепываемость были изготовлены точением заклепки-стержни из прутка ВТ 16 сплошные, а также с поднутрениями цилиндрической формы, заполненными стержнями заклепок из В 65.

Для обеспечения надежного качества замыкающей головки был разработан способ клепки с использованием технологических втулок-колец, а также пуансонов со специально спрофилированными углублениями.

В процессе расклепывания, начиная с усилия 120 КН в замыкающей головке стали появляться кольцевые, в плане торца, растрескивания. С целью устранения трещинообразования усилие клепки было снижено до $R_{кЛ} = 100$ КН, а для сохранения раздачи зазор по отверстию был уменьшен до 0,05 мм. При этом раздача пакета осуществлялась до глубины 1,0 d, считая от замыкающей и головки, и составляла от 0 до 1,5%. Края отверстия пакета были при этом обмяты замыкающей головкой (на глубине 0,5 мм) до величины 2,9% в варианте 2 и на глубине 1,1 мм до 4,9% в варианте 1.

Так, для заклепки диаметром 8 мм из стали 20Г2 это усилие составляет 175,0 КН, а для сплава ВТ 16 – 140,0 КН. Вместе с тем, в имеющейся практике нашли широкое применение заклепки, в том числе из высокопрочных сплавов, с поднутрением в стержне заклепки, которые рекомендовались для соединений небольших толщин и деталей из композиционных материалов.

Усилие расклепывания стержня с поднутрением для ВТ 16 в закаленном и состаренном состоянии при этом было на 20-25 % больше, чем для аналогичных заклепок из ВТ 16 отожженного. С помощью закаленных заклепок-стержней диаметрами 6,0 и 8,0 мм, из материала ВТ 16, были проведены эксперименты по исследованию раздачи пакета стержнями с целью предварительного изучения процесса запрессовки, а также влияния утонения диаметра стержня и фаски под замыкающую головку для обеспечения равномерной по толщине пакета раздачи.

Эксперименты показали, что применение заклепок с увеличением предела прочности (закалка-старение) возможно при изменении способа клепки на стесненную при помощи конструктивных или технологических средств, который может быть осуществлен и для имеющегося оборудования и импульсного инструмента типа КИМ-6С.

Дальнейшие результаты были получены для заклепок из отожженного сплава ВТ 16. Заклепки из данного материала позволили получить стабильные

результаты при исследовании качества и прочности соединений на их основе без применения специального стесненного способа клепки.

Были исследованы конструкции со сплошным, коническим, ступенчатым стержнем, стержнем, имеющим отверстие (поднутрение), заглушенное пластичной бобышкой из сплава В 65. Исследовано распределение натяга в деталях пакета из Д16АТВ с толщиной пакета $S_p = 17,0$ мм, $t_p = 2,8$ мм, для заклепок из сплава ВТ 16 диаметром 6,0 мм с центральным поднутрением $d_0 = 3,0$ мм, которое вызывает удовлетворительную величину радиального натяга в пределах 0,8...1,5 %.

Механические характеристики и конструктивные формы заклепок позволяют управлять качеством и в частности радиальной раздачей отверстий в соединениях. Так, низкую пластичность высокопрочных заклепок из закаленного сплава ВТ 16 можно использовать в средней части пакета, где необходима, высокая прочность на срез, а недостаток пластичности компенсировать кольцевыми компенсаторами в виде технологических и конструктивных шайб и формы пуансона.

Заклепки были получены точением из потайных болтов $d_b = 8,07$ мм (под натяг 1%) из титанового сплава ВТ 16. Болты обрезались до длины, соответствующей пакету $S_p = 2 d$, и со стороны замыкающего торца выполнялось поднутрение диаметром равным 0,5 d и глубиной 1,15 d.

Стесненная клепка также позволяет регулировать радиальную раздачу стержня заклепки путем соответствующего подбора шайбы ограничительно-го элемента.

В качестве наиболее эффективного конструктивного варианта выбрана непотайная заклепка с полым коническим хвостовиком, заполненным стержнем из сплава В 65 и шайбой из ВТ 16 размером $D_{ш} = 1,4...1,5 d$; толщиной $t_{ш} = (0,2...0,3) d$. При выборе вариантов было учтено, в соответствие с ранее проведенными исследованиями, что при усилии клепки заклепок с поднутрением $R_{кЛ} = (0,45 - 0,5) R_{норм}$, зона раздачи достигает глубины $(0,4 - 0,5) d_3$ от замыкающей головки.

Дальнейшее совершенствование конструктивных вариантов связано с оптимизацией формы поднутрения в стержне заклепки.

3. Выбор рациональных параметров поднутрения в стержне заклепки

Как уже отмечалось, одним из основных препятствий, ограничивающих широкое применение заклепок из высокопрочных сталей и титановых сплавов, является значительное усилие клепки

сплошного стержня заклепок, приводящее к чрезмерной раздаче материала пакета.

Для оптимизации формы поднутрения по его глубине для заклепок большого диаметра из сплавов ВТ 16 были проведены эксперименты по раздаче для заклепок из сплава ВТ 16 диаметром 8,0 мм, полученных высадкой.

Как показал эксперимент, величина выполнения поднутрения диаметром более $d_0 = (0,5 - 0,7) d$ приводит к образованию трещин и сколов по кольцевым цилиндрическим плоскостям, поэтому более предпочтительным является поднутрение диаметром $d_0 = 0,5 d$ глубиной $L_0 = (1,0...1,1) d$.

Все заклепки клепались специально спроектированным и изготовленным пуансоном с центральным профилированным углублением, ограничивающим чрезмерную раздачу замыкающей головки.

Эксперименты показали, что диаметр поднутрения, с учетом предполагаемой погрешности при проведении испытаний и замеров, в диапазоне 2,0-4,0 мм незначительно влияет на раздачу в заклепочном соединении, но при $d_0 = 2,0$ мм, усилие клепки уменьшается всего на 6+10%, а при $d_0 = 4,0$ мм на 35+40%.

Увеличение глубины поднутрения примерно до середины пакета вызывает увеличение раздачу по отверстию на 0,5%.

Исследовалось также влияние торцевой фаски и шайбы под замыкающей головкой на раздачу соединения. Целесообразным оказалось уменьшение угла заправки под фаску от 90° до = 50...70°.

Экспериментальные исследования показали, что для заклепки из титанового сплава ВТ-16 можно выбрать цилиндрическое поднутрение с параметрами: $d_0 = 4,0 \times 9,0$ мм, либо оживальное поднутрение, при удовлетворительном качестве раздачу по толщине пакета. На основании проведенных экспериментов также можно сделать вывод, что наиболее оптимальной по форме, с наиболее стабильными результатами на качестве соединений при раздаче является поднутрение оживально-конической формы.

Материал образцов: Д16АчТ, анодированный с последующей фрезеровкой по контуру. Толщина пакета $S_p = 2 d$. Все испытания производились на разрывной машине ЦД 10-90. Выполнение с заполненным поднутрением в стержне заклепки из ВТ 16 в пределах точности эксперимента не сказалось на уменьшении усилия среза крепежа. Вместе с тем, сквозное заполненное поднутрения диаметром 0,5 d, уменьшило усилие среза в односрезных образцах на 15 ÷ 25%, а в двухсрезных – на 5÷8%. Установка заклепок с радиальным натягом $1 \pm 0,2\%$ увеличивала статическую прочность образцов на (5... 6)%.

Таким образом, результаты эксперимента по определению усилия среза показали возможность применения заклепок из титанового сплава ВТ 16 с заполненным поднутрением диаметром $d_0 = 0,5 d$ и $L_0 = 1,15 d$ без уменьшения статической прочности крепежа в соединении.

4. Экспериментальное определение усилия среза и отрыва заклепочного крепежа из титанового сплава ВТ 16

Испытания на срез производились на материале образцов: Д16АчТ, анодированном с последующей фрезеровкой по контуру. Толщина пакета $S_p = 2d$. Все испытания производились на разрывной машине ЦД 10-90. Выполнение с рекомендуемым заполненным поднутрением в стержне заклепки из ВТ 16 в пределах точности эксперимента сказалось на уменьшении усилия среза крепежа до 6-8%.

Результаты экспериментального определения усилия отрыва для заклепочного крепежа из титанового сплава ВТ 16 показали, что увеличение высоты выступания стержня заклепки перед клепкой с $0,8 d$ до $0,9 d$ приводит к увеличению статической прочности, а при высоте выступания стержня $h_0 \geq 0,9 d$ усилие отрыва непотайных заклепок практически не зависит от высоты выступания и составляет $R_{отр.} = 1,0 R_p$.ст. Для потайных заклепок усилие отрыва колеблется от 0,65 до 0,95 R_p .ст. и не зависит от высоты выступания стержня при $h_0 \geq 1,1 d$, составляя величину $R_{отр.} \equiv 0,95 R_p$.ст.

Проведенные исследования усилия отрыва замыкающих головок показали, что высоту h_0 выступания стержня заклепки над пакетом перед клепкой и параметры поднутрения $L_0 \times d_0$ целесообразно выбирать в пределах:

$$h_0 = (0,9 \div 1,0) d; L_0 \times d_0 = 1,1 d \times 0,5 d.$$

При этом, для избегания растрескивания при осадке замыкающей головки, поднутрение должно быть заполнено стержнем из В 65 либо другим пластичным материалом.

Для оценки усталостной эффективности спроектированных и изготовленных вариантов крепежа из высокопрочного титанового сплава ВТ 16 было использовано приспособление для испытаний крепежа при действии осевых циклических нагрузок. Оно позволяет испытывать выносливость крепежа в условиях, близких к реально действующим в соединении при наличии изгибных напряжений.

Вариант с оживальным поднутрением и ограничительной шайбой на уровне 0,3...0,4 от разрушающего показал близкие результаты к выносливости болтовых соединений.

Выводы

Проведенная технологическая отработка намеченных конструктивных решений: рациональной формы закладной головки и компенсаторов; предварительной запрессовки; выполнение поднутрения; использование ограничительной шайбы; варьирование геометрии стержня заклепки, показала, что данные факторы являются эффективным средством повышения качества и надежности соединений на основе заклёпок из титанового сплава ВТ 16.

Поднутрение в заклепках из сплава ВТ 16 необходимо выполнять конусно-оживальной формы со средним диаметром $d_0=0,5 d$ и глубиной $L_0 = (1,0...1,1) d$, а также заполнять его пластичным материалом из сплава В 65.

Эффективными средствами обеспечения заданного уровня радиальной раздачи $(0,8...1,5)\%$ является ограничительная шайба с параметрами $D_{ш} = (1,4...1,5) d$; $t_{ш} = (0,2...0,25) d$, а также возможно применение торцевой фаски по отверстию.

Спроектированные заклепки из сплава ВТ 16 для установки с предварительным натягом необходимо клепать при образовании соединений в пакетах из алюминиевого сплава Д16АТ с учетом ограничения раздачи под замыкающей головкой конструкторским (поднутрение, геометрия стержня, шайба) либо технологическим способом (клепка с технологической шайбой, с поджатием, использованием технологического хвостовика).

Литература

1. Данов, А. С. Анализ возможности применения заклёпок из титанового сплава ВТ 16 с поднутрением и ограничительной шайбой [Текст] / А. С. Данов // Проблемы створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тез. доп. Міжнарод. наук.-техн. конф. 24-25 квітня 2007. – Х., 2007. – С. 29.

2. Данов, А. С. Определение локального НДС заклёпочных соединений, выполненных стеснённой клёпкой [Текст] / А. С. Данов // Проблемы створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки : тез. доп. Міжнарод. наук.-техн. конф. 22-23 квітня 2009. – Х., 2009. – С. 25.

Поступила в редакцию 7.06.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии производства ЛА С. И. Планковский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА УТОМЛЕНИХ ХАРАКТЕРИСТИК З'ЄДНАНЬ ІЗ СПЛАВА Д16АТ ТИТАНОВИМИ ЗАКЛЕПКАМИ З ВТ 16 З ОБМЕЖУВАЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ПРИ СТИСНЕНОМУ ОСАДІ

О. С. Данов

Проведено статичні випробування на роздачу, міцності на відрив і зріз заклепок з титанового сплаву ВТ 16. Визначено вплив механічних характеристик і конструктивних форм заклепок з ВТ 16 на якість з'єднань з Д16АТ. Застосовано стиснену осадку, що реалізована конструктивно-технологічними засобами: заповнене поднутрення, шайба, втулка, пуансон. Визначено раціональні параметри поднутрення в стержні заклепки, параметри шайби, жорсткість з'єднань і утомлені випробування на осьові навантаження. Визначено вплив технологічних відхилень по зусиллю клепки на якість з'єднань. Розроблено рекомендації щодо зниження надмірної роздачі з'єднань титановими заклепками.

Ключові слова: статичні випробування, титанові заклепки, поднутрення, утонення, запресовування, осьове циклічне навантаження, роздача, стиснене осідання.

RESEARCH OF STATIC AND FATIGUE CHARACTERISTICS OF D16AT ALLOY JOINTS FROM VT 16 TITANIC RIVETS WITH RESTRICTIVE ELEMENTS AT CONSTRAINED PRESSING

A. S. Danov

Static tests are conducted on a radial pressing, axial and shear strength of VT 16 rivet joints. The influence of mechanical properties and structural forms of rivets from VT 16 to the quality of the D16AT joints research are defined. The straitened pressing is realized by structural-technological facilities: filled whole, washer, hob, punch. Rational parameters are defined in the rivet rod undercut whole, rivet connections stiffness and fatigue tests on axial loads. The influence of technological deviations from riveting press forces on quality connections are determinates. Recommendations to reduce the excessive radial pressing of connections with titanium rivets are developed.

Key words: static tests, titanium rivet, cylinder, riveting, undercut whole, thinning, axial pressing, axial cyclic tense, cramped rivet pressinge.

Данов Александр Сергеевич – старший преподаватель каф. конструкции самолётов и вертолётów, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: danovas5@gmail.com.