

О РАСЧЁТУ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАКЛЁПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Сергей Сергеевич ШИШКИН родился в 1984 г. в городе Москве. Младший научный сотрудник ИМАШ РАН. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области неклассических конструкционно-контактных задач и теоретической герметологии. Автор пяти научных работ. E-mail: ssshisha@yandex.ru

Sergey S. SHISHKIN, was born in 1984, in Moscow. He is a Postgraduate Student at the MAI as well as a Junior Research Associate at the Blagonravov Theoretical Engineering Institute (IMASh) of the Russian Academy of Sciences. His research interests are in non-classical structural contact problems and theoretical leak tightness. He has published 5 technical papers. E-mail: ssshisha@yandex.ru

Предложена методика расчёта на герметичность авиационных заклёпочных соединений при наличии сплошного контакта между поверхностями листов и стержня заклёпки на базе теории пористого слоя. Рассмотрен простейший способ расчёта контактного давления в заклёпочном соединении по теории малых упруго-пластических деформаций на основе прямых измерений компонент деформаций в листах. Установлено, что в области реальных технологических параметров заклёпочных соединений герметичность во многом определяется высотой микронеровностей на поверхности отверстия и в значительно меньшей степени — контактным давлением.

A technique is suggested to analyze leak tightness for aircraft rivet joints with complete contact between plate surfaces and rivet shank. The technique is based on the theory of a porous layer. A simple procedure is discussed to calculate the contact pressure in a rivet joint according to the theory of small plasto-elastic deformations basing on direct measurements of component deformations in plates. It is revealed that in domain of real-world process variables for rivet joints leak tightness is determined by height of microroughnesses on the hole surface. The contact pressure value is demonstrated considerably smaller influence the leak tightness.

Ключевые слова: герметичность, расход, сплошной контакт, пористый слой, опорная кривая, микронеровность, контактное давление.

Key words: leak tightness, consumption, complete contact, porous layer, supporting curve, micro roughness, contact pressure.

Герметология является актуальным направлением развития науки и техники; эксплуатационные свойства различных технических систем, включая летательные аппараты, всё больше зависят от герметичности отдельных узлов и деталей. В современной авиации основным видом соединений являются заклёпки, что определяет их важнейшую роль в достижении непроницаемости отсеков.

Герметичные свойства заклёпочных соединений определяются созданием сплошного контакта между сопрягаемыми поверхностями листов и стерж-

ня заклёпки при достаточно высоком уровне контактного давления. В таких условиях утечки рабочего тела обусловлены наличием микронеровностей на этих поверхностях, что приводит к появлению пустот в зоне контакта вне зависимости от технологии исполнения соединений.

Утечки уплотняемой среды в панелях (рис. 1) происходят между соединяемыми листами и по границе заклёпки с поверхностью отверстия. Поскольку реальный технологический процесс не обеспечивает плотного прилегания стыкуемых ли-

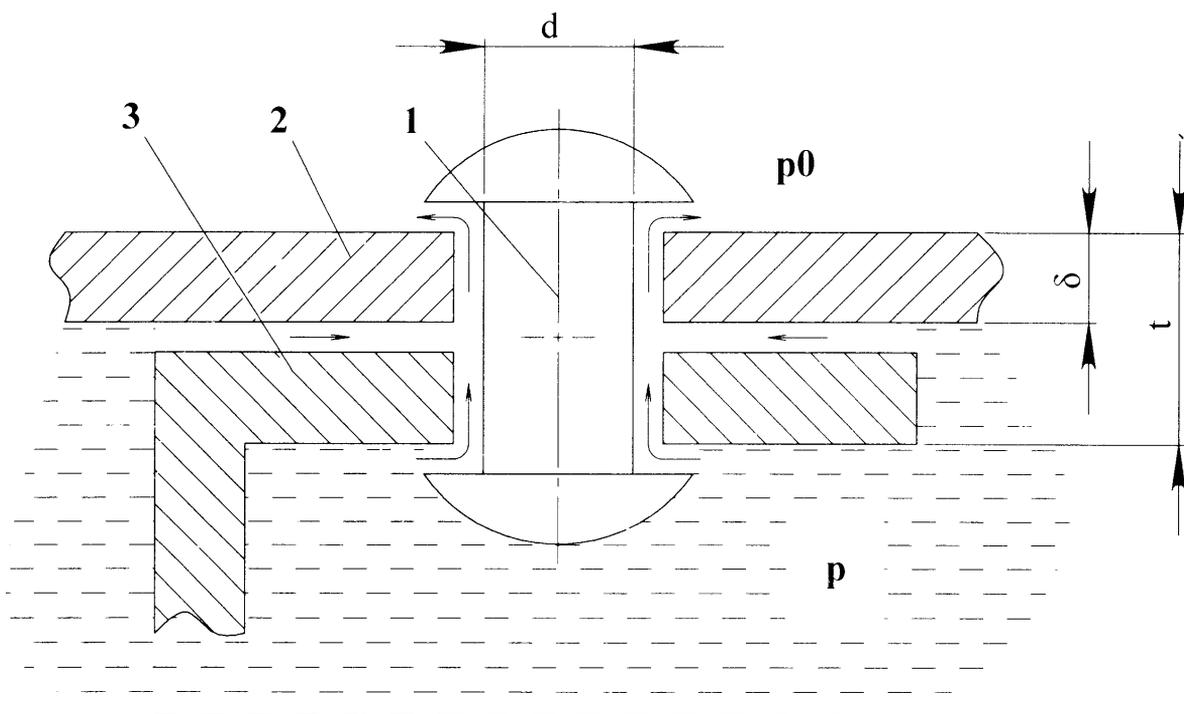


Рис. 1. Направление утечки топлива в зоне заклёпочного соединения при отсутствии герметизации: 1 — заклёпка; 2 — обшивка; 3 — стрингер

стов, проницаемость в месте их контакта оказывается несоизмеримо больше проницаемости вдоль стержня заклёпки, что позволяет не рассматривать этот контакт в качестве барьера герметизации.

Анализ известных работ в области теоретической герметологии показывает, что при сохранении сплошности контакта наиболее перспективной для расчёта авиационных заклёпок является методика определения утечек уплотняемой среды через металл-металлический контакт, предложенная в работе [1] на основе теории пористого слоя. Данная модель применима для любого протяжённого контакта и неоднократно проверена экспериментально. Её важными преимуществами являются независимость от конструктивно-технологических параметров соединения и использование в качестве исходных данных коэффициентов опорных кривых, что позволяет учитывать реальное распределение материала по высоте. Величина расхода жидкой среды (топлива) через цилиндрический контакт в условиях стационарного изотермического ламинарного течения определяется из уравнения неразрывности фильтрационного потока

$$Q = \frac{\pi d K h (p - p_0)}{12 \mu_S l_K}, \quad (1)$$

где d — диаметр заклёпочного соединения (мм); μ_S — динамическая вязкость среды (мПа·с);

h — эквивалентная толщина пористого слоя (мкм); l_K — эффективная длина продольного контакта (мм); p — давление жидкости в рабочей зоне (МПа); p_0 — давление жидкости вне рабочей зоны (МПа); K — коэффициент проницаемости (мкм²).

Эффективная длина продольного контакта l_K определяется конструктивными особенностями соединения. Для непотайных заклёпок с внутришовным герметиком она равняется толщине пакета t , а при его отсутствии — толщине обшивки δ .

Аналогичная зависимость для газа:

$$Q_m = \frac{\pi d M K h (p^2 - p_0^2)}{0,024 \mu_S l_K R T}, \quad (2)$$

где M — молярная масса газа (г/моль); T — температура рабочего тела (К); R — универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(К·моль).

Деформация шероховатости при расклёпывании описывается величиной относительного контактного сближения ϵ . При этом эквивалентная толщина пористого слоя определяется в следующем виде:

$$h = (Rz_1 + Rz_2)(1 - \epsilon). \quad (3)$$

Индекс «1» указывает на листы, «2» — на стержень заклёпки.

Численное значение величины ϵ можно найти с помощью универсальных формул, полученных

И.В. Крагельским для случая контактирования двух шероховатых поверхностей [5]:

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt[3]{\frac{p_c}{p_r}}, \quad (4)$$

где p_c — контурное давление; при отсутствии волнистости $p_c \approx q$; p_r — фактическое давление; при $q \leq \text{НВ}/3$ $p_r = \text{НВ}$; НВ — твёрдость по Бринеллю наиболее мягкого материала соединения.

Отметим, что превышение контактной нагрузки $q > \text{НВ}/3$ требует учёта пластических деформаций основного материала с упрочнением, однако в практических расчётах их влиянием можно пренебречь.

Коэффициент проницаемости пористого слоя K определяется уравнением Козени—Кармана в зависимости от параметра пористости m и удельной поверхности соприкосновения микронеровностей с уплотняемой средой B , мм^{-1} :

$$K = \frac{Um^3}{B^2}, \quad (5)$$

где U — постоянная Кармана $U \approx 0,2$.

При описании рельефа сопрягаемых поверхностей с помощью опорных кривых для металл-металлического контакта с близкими значениями твёрдости сопрягаемых поверхностей величины m и B определяются следующими выражениями [1]:

$$m = 1 - \frac{2 \left(\frac{\beta \varepsilon_p^{v+1}}{v+1} + \beta(1-\varepsilon_p)\varepsilon_p^v + \frac{b(1-\varepsilon_p)^{n+1}}{n+1} \right)}{2-\varepsilon}; \quad (6)$$

$$B = 2 \frac{(v+2)^{0,67} - \beta \varepsilon_p^{v+0,67}}{Rz \sin \frac{\beta_x}{2} \sin \frac{\beta_y}{2} (v+2)^{0,67} (1-m)(2-\varepsilon)},$$

где β , v — коэффициенты опорной кривой верхнего участка; b , n — коэффициенты опорной кривой нижнего участка; ε_p — относительное сближение в точке перегиба $\varepsilon_p = 0,35$; β_x — среднее значение углов при вершинах продольной шероховатости; β_y — среднее значение углов при вершинах поперечной шероховатости;

Приближённо будем принимать $\beta_x \approx 120^\circ$ и $\beta_y \approx 70^\circ$.

Выражения (6) получены в предположении одинаковой обработки сопрягаемых поверхностей.

В противном случае необходимые параметры Rz , v , β , b и n можно найти из формул эквивалентной шероховатости [5]:

$$Rz = \frac{Rz_1 + Rz_2}{2}; \quad v = \frac{v_1 + v_2}{2}; \quad b = \sqrt{b_1 b_2};$$

$$\beta = \sqrt{\beta_1 \beta_2} \sqrt{\frac{2Rz^v}{Rz_1^{v_1} + Rz_2^{v_2}}}; \quad n = \frac{n_1 + n_2}{2}. \quad (7)$$

Высота микронеровностей и коэффициенты опорных кривых

№	Вид чистовой обработки	Высота микронеровностей и коэффициенты опорных кривых		
		Rz , мкм	β	v
1	Сверление	12,0	1,49	1,27
2	Зенкерование	8,3	1,56	1,39
3	Развёртывание	2,5	1,72	1,65
4	Заклёпка	2,5	2,12	1,43

Отметим, что выражение для параметра β в строгой постановке является гораздо более сложным, однако для реальных значений коэффициентов v_1 и v_2 предложенная зависимость является достаточно точной. Неизвестные параметры β и v стандартизованы в зависимости от методов обработки поверхности приведены в табл. 1, а значение b определяется из предположения о конической форме микровыступов ($n = 1$):

$$b = 1,54 (1 - \beta \varepsilon_p^v). \quad (8)$$

Величина контактного давления в заклёпочном соединении может быть найдена с помощью расчётно-экспериментальной методики, предложенной С.Л. Васильевым [2]. Она строится на основе прямых измерений компонент деформаций в листах возле отверстия методом тензометрии с дальнейшим расчётом напряжений по теории малых упруго-пластических деформаций. Формула для контактного давления q имеет вид [3]

$$q = - \left(\frac{2\sigma_i(\varepsilon_r - \varepsilon_0)}{3\varepsilon_i} + \sigma_0 \right);$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_x}{3}; \quad \sigma_0 = \frac{E\varepsilon_0}{1-2\mu}, \quad (9)$$

где ε_r — радиальная деформация в листах; σ_i — интенсивность напряжения в листах; ε_i — интенсивность деформации в листах; μ — коэффициент Пуассона.

В рамках инженерных расчётов осевые (ϵ_x) окружные (ϵ_t) и радиальные (ϵ_r) деформации в листах полагаются главными, что позволяет определять значение ϵ_i по теории деформаций как [3]

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_t)^2 + (\epsilon_t - \epsilon_x)^2}. \quad (10)$$

Соотношения между интенсивностью напряжения σ_i и деформации ϵ_i определяется на основе представления деформационной кривой материала листа в квазилинейной форме [3]:

$$\begin{aligned} \sigma &\leq \sigma(S); \quad \sigma_i = \epsilon_i E; \\ \sigma &> \sigma(S); \quad \sigma_i = \lambda \sigma(S) + \epsilon_i (1 - \lambda) E; \\ \lambda &= 1 - \frac{\sigma(B) - \sigma(S)}{\epsilon(B) E - \sigma(S)}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$Q = \frac{12 \mu_s l_k}{\pi d (p - p_0)} \cdot 10^{10} \text{ мм}^3$$

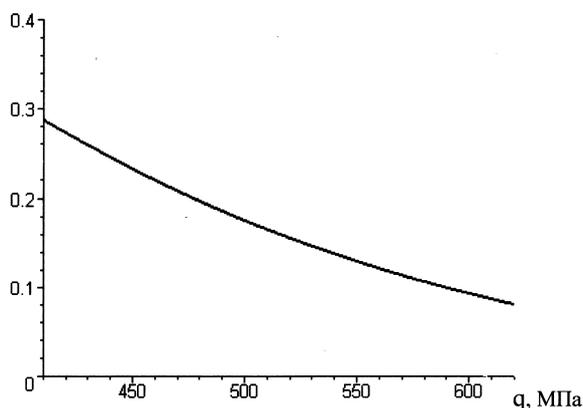


Рис. 2. Влияние контактного давления на герметичность заклёпочных соединений. Метод обработки отверстия — сверление

$$Q = \frac{12 \mu_s l_k}{\pi d (p - p_0)} \cdot 10^{10} \text{ мм}^3$$



Рис. 3. Влияние шероховатости на герметичность заклёпочных соединений: $q = 400$ МПа (кривая 1 получена для постоянных значений β и ν для сверления)

где E — модуль упругости материала листа; $\sigma(S)$ — предел текучести материала листа; $\sigma(B)$ — предел прочности материала листа; $\epsilon(B)$ — деформация на пределе прочности материала листа.

На основе полученных зависимостей в области реальных натягов $\omega = 2...5\%$ для материалов В65 и Д16АТ величина контактного давления превышает 400 МПа. В таких условиях величина расхода авиационного керосина ТС-1 через одиночное заклёпочное соединение составляет порядка $1 \cdot 10^{-2}$ мм³/с ($d = 5$ мм, перепад давления $p - p_0 \sim 0,1$ МПа, $l_k = 2$ мм, динамическая вязкость топлива при 20°C $\mu_s = 1,014$ мПа·с).

На рис. 2 и рис. 3 представлены графики влияния контактного давления и шероховатости на герметичность заклёпки при сохранении сплошности контакта.

Выводы

Результаты исследований показывают, что высота микронеровностей поверхности отверстия оказывает решающее воздействие на герметичность. Например, при чистовой обработке зенкерованием проницаемость контакта снижается на 30% относительно сверления, а при развёртывании — в 8 раз (при давлении 400 МПа). Величина контактного давления также влияет на герметичность (расчёты для обработки отверстия сверлением), однако данная зависимость нуждается в дальнейших исследованиях с учётом нагружения заклёпочных соединений.

Библиографический список

1. Бабкин В.Т., Зайченко А.А., Александров В.В. Герметичность неподвижных соединений гидравлических систем. — М.: Машиностроение, 1977.
2. Васильев С.Л. Исследование взаимного влияния технологии выполнения и геометрических параметров клёпанных швов на их усталостную прочность в конструкциях самолётов: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. — М.: МАИ, 1981.
3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1968.
4. Пинчук Л.С. Герметология. — Минск: Наука и техника, 1992.
5. Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2 кн. /Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисиана. — М.: Машиностроение, 1978. — Кн.1.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 21.04.2009