

С.Л. Васильев  
В.Ф. Громов  
Московский авиационный институт  
А.Ф. Макаров  
Университет природы, общества и человека

## СБОРКА КОНСТРУКЦИЙ КЛЕПКОЙ СТЫКОВЫХ ШВОВ С НЕОТВЕРЖДЕННЫМ ВНУТРИШОВНЫМ ГЕРМЕТИКОМ

Статья посвящена технологии сборки швов авиационных конструкций с внутришовным герметиком, клепку которых целесообразно выполнять в период жизнеспособности герметизирующего материала.

В процессе клепки длинномерных швов с внутришовным герметиком на автоматическом оборудовании целесообразно все соединения выполнять в предварительно собранной конструкции за период жизнеспособности герметика. При сверлении отверстий под крепеж на клепальном автомате толщина слоя герметика не должна превышать 0,1 мм для исключения попадания стружки между деталями пакета, налипания герметика на режущий инструмент и обеспечения максимальной усталостной долговечности конструкции в зоне клепаного шва.

Герметичные стыковые швы (ГСШ) как правило бывают многорядными. Трудоемкость предварительной сборки конструкции и последовательная клепка соединений практически всегда превышает период жизнеспособности герметика. Целесообразно первоначально выполнять клепку шва с увеличенным шагом, превышающим шаг заклепок в шве, а затем проклепывать промежутки между ними.

Важным фактором при клепке является вытеснение внутришовного герметика от усилия сжатия пакета прижимными втулками автомата в зоне выполняемого соединения. Вытеснение герметика можно разбить на два этапа:

- первый – от воздействия усилия сжатия пакета прижимными втулками,
- второй – после постановки заклепки – от упругой деформации обшивки.

Необходимо определить общее время  $T$  вытеснения герметика из шва от начальной толщины слоя герметика  $S_0$  до его конечной величины  $S_K \leq 0,1$  мм.

Принимаем на этапе один время вытеснения герметика из пакета  $T_1$  равным интервалу времени от момента приложения усилия прижимными втулками  $P$  до момента касания сверлом слоя герметика между деталями. Время для вытеснения герметика до толщины  $S_k$ , определим из расчетной схемы на рис. 1, учитывающей следующие параметры:

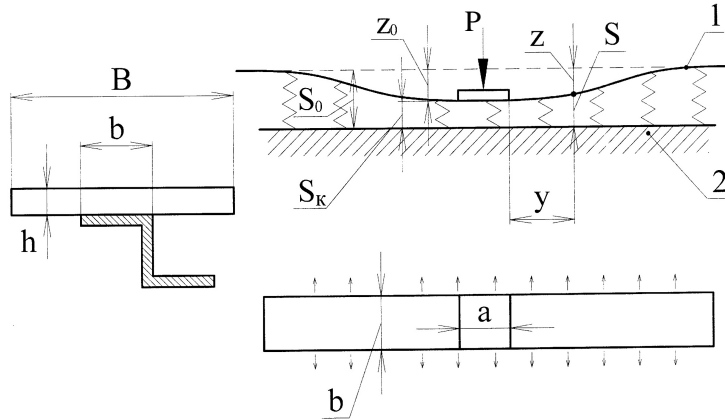


Рис. 1. Расчетная схема этапа 1:  $P$  – сила сжатия пакета,  $H$ ,  $S_0$  – начальная толщина слоя герметика, м,  $S_k$  – конечная толщина слоя герметика под прижимом, м,  $b$  – ширина полосы герметика в шве, м,  $a$  – размер принимаемой равным диаметру прижимной втулки со стороны обшивки, м,  $B$  – ширина обшивки, участвующая в изгибе, м,  $h$  – толщина обшивки, м,  $z = z(y)$  – прогиб обшивки, м,  $z_0$  – прогиб обшивки под прижимом, м

Рис. 1. Schemat obliczeniowy etapu 1.

Модель учитывает вытеснение герметика из шва только в поперечном направлении. Осреднённое удельное давление  $p$ , и скорость сближения поверхностей  $v$  связаны зависимостью:

$$p = \frac{\mu \cdot b^2 \cdot v}{S^3} \quad (1)$$

где:  $\mu$  – вязкость герметика.

При  $p = \text{const}$  для жестких поверхностей время вытеснения герметика определяется:

$$T_1 = \frac{\mu \cdot b^2}{2 \cdot p} \cdot \left( \frac{1}{S_k^2} - \frac{1}{S_0^2} \right) \quad (2)$$

где:  $p = \frac{P}{F}$ ,

$F$  – площадь сжатия.

Принимаем стрингер как абсолютно жёсткий элемент конструкции по сравнению с обшивкой. Вследствие изгиба обшивки величина  $S = S(y)$  вдоль шва будет переменной. Усилие прижима расходуется на вытеснение герметика под прижимом и под прилегающими участками обшивки с обеих сторон прижима.

Приняв полосу обшивки как балку, а герметик, как упругое основание, упругая линия прогиба обшивки определяется в виде:

$$z(y) = z_0 \cdot e^{-\beta y} \cdot (\cos(\beta y) + \sin(\beta y)) \quad (3)$$

где:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4 \cdot E \cdot I}}, 1/\text{м} \quad (4)$$

$E = 7 \cdot 10^4$  МПа – модуль упругости материала обшивки из алюминиевого сплава,

$I = \frac{B \cdot h^3}{12}$ ,  $\text{м}^4$  – момент инерции участка обшивки,

$$k = \frac{p \cdot b}{z} = \frac{\mu \cdot b^3 \cdot \nu}{S^3 \cdot z} \quad (5)$$

Коэффициент жесткости слоя герметика  $k$  переменный вдоль шва и зависит от времени. Формулу (3) можно представить в виде:

$$z(y) = z_0 \cdot e^{-\frac{y}{L}} \cdot \left( \cos\left(\frac{y}{L}\right) + \sin\left(\frac{y}{L}\right) \right) \quad (6)$$

где:  $L = \frac{1}{\beta}$  м.

В этом случае, давление под прижимом можно определить как:

$$p = \frac{P}{(a + 2 \cdot L) \cdot b} \quad (7)$$

То есть, к жёсткому прижиму присоединяются с обеих сторон участки обшивки длиной  $L$  и таким образом учитывается жёсткость обшивки.

Для использования аналитической зависимости из теории изгиба балки на упругом основании, примем коэффициент жёсткости постоянным вдоль шва, и соответствующим средней толщине слоя герметика  $S_{cp} = 0,5 \cdot (S_0 + S_k)$ , тогда формула (5) примет вид:

$$k = \frac{\mu \cdot b^3 \cdot v}{S_{cp}^3 \cdot z} \quad (8)$$

а  $z = S_0 - S_{cp}$ . Так как средняя скорость сближения обшивки и стрингера  $v_{cp} = \frac{z}{T_1}$ , то получаем коэффициент жесткости слоя герметика:

$$k = \frac{\mu b^3}{S_{cp}^3 T_1} \quad (9)$$

$$T_1 = \frac{\mu \cdot b^2}{2 \cdot P} \cdot \left( \frac{1}{S_k^2} - \frac{1}{S_0^2} \right) = \frac{\mu \cdot b^3 \cdot (a + 2 \cdot L)}{2 \cdot P} \cdot \left( \frac{1}{S_k^2} - \frac{1}{S_0^2} \right).$$

С учетом (9)

$$k = \frac{\mu \cdot b^3}{S_{cp}^3 \cdot T} = \frac{2 \cdot P}{S_{cp}^3 \cdot (a + 2 \cdot L)} \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{S_k^2} - \frac{1}{S_0^2} \right)}, \text{ а } L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{k}} \quad (10)$$

Расчёт выполняется последовательным приближением до получения стабильного значения  $L$ .

На втором этапе прогиб обшивки после клепки заклепки и снятия усилия сжатия пакета определяется расчетной схемой, рис. 2.

Определим время вытекания герметика  $T_2$ , необходимое для уменьшения зазора  $S$  до величины  $S_1$  на расстоянии  $y = l$  от края прижима. В первом приближении шаг технологических точек равен  $t_1 = a + l$ .

Для решения поставленной задачи также воспользуемся теорией стержней на упругом основании. Коэффициент жёсткости слоя герметика с течением времени уменьшается, а зона сжатия расширяется. Учитывая, что  $S_{cp} = 0,5 \cdot (S_0 + S_k)$ , а  $z_{cp} = 0,5(S_0 - S_k)$ :

$$k = \frac{8 \cdot \mu \cdot b^3 \cdot v_{cp}}{(S_0 + S_k)^3 \cdot z_{cp}} = \frac{8 \cdot \mu \cdot b^3}{(S_0 + S_k)^3 \cdot T} \quad (11)$$

Поскольку время связано с жёсткостью слоя герметика, то с учетом зависимости (4) получаем расчетную формулу для  $T_2$ :

$$T_2 = \frac{2 \cdot \mu \cdot b^3 \cdot L^4}{(S_0 + S_k)^3 \cdot E \cdot I} \quad (12)$$

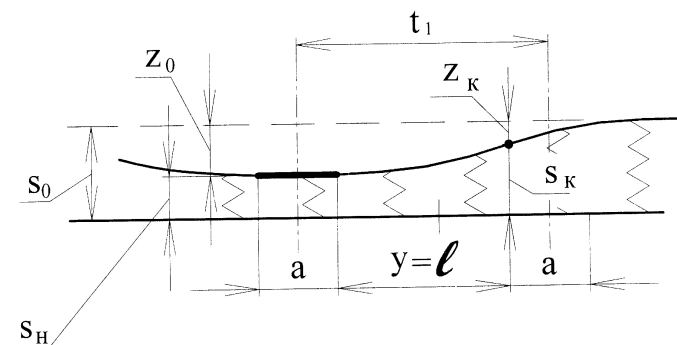


Рис. 2 Расчетная схема этапа 2

Rys. 2. Schemat obliczeniowy etapu 2.

Значения функции прогиба  $z(y)$  приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения функции прогиба

Tabela 1. Wartości funkcji ugięcia

$\frac{y}{L}$	$e^{\frac{y}{L}} \cdot \left( \cos\left(\frac{y}{L}\right) + \sin\left(\frac{y}{L}\right) \right)$	$\frac{y}{L}$	$e^{\frac{y}{L}} \cdot \left( \cos\left(\frac{y}{L}\right) + \sin\left(\frac{y}{L}\right) \right)$
<b>0,0</b>	1,0000	<b>1,1</b>	1,0000
<b>0,1</b>	0,9907	<b>1,2</b>	0,8100
<b>0,2</b>	0,9651	<b>1,3</b>	0,6398
<b>0,3</b>	0,9267	<b>1,4</b>	0,4888
<b>0,4</b>	0,8784	<b>1,5</b>	0,3564
<b>0,5</b>	0,8231	<b>1,6</b>	0,2415
<b>0,6</b>	0,7628	<b>1,7</b>	0,1431
<b>0,7</b>	0,6997	<b>1,8</b>	0,0599
<b>0,8</b>	0,6354	<b>1,9</b>	-0,0093
<b>0,9</b>	0,5712	<b>2,0</b>	-0,0657
<b>1,0</b>	0,5083	-	-

Последовательность расчёта шага заклепок в технологическом шве в зависимости от требуемого времени  $T_2$  следующая:

1. По требуемой величине слоя герметика  $S_K$  находим  $Z_K$  как  $Z_K = S_0 - S_K$  (в первом приближении  $L = 0,05$  м).

2. Относительный прогиб обшивки  $\bar{Z} = \frac{Z_K}{Z_0} = \frac{Z_K}{S_0 - S_K}$ , где  $Z_0 = S_0 - S_K$  есть прогиб в районе установленной заклепки.

3. По величине  $\bar{Z}_K$  и функции прогиба находим из таблицы 1 относительную длину  $\bar{L} = \frac{1}{L}$ ,  $l = t_1 - a$ . Отсюда требуемая величина  $L$ :

$$L = \frac{1}{\bar{L}} = \frac{t_1 - a}{\bar{L}}.$$

4. Подставляем в формулу (12) время  $T_2$ , необходимое для вытекания герметика до величины  $S_T$  и находим время  $T$ :

$$T = \frac{2 \cdot \mu \cdot b^3 \cdot \left( \frac{t_1 - a}{\bar{L}} \right)^4}{(S_0 + S_K)^3 \cdot E \cdot I} = 2 \cdot \mu \cdot \left( \frac{b}{S_0 + S_K} \right)^3 \cdot \frac{\left( \frac{t_1 - a}{\bar{L}} \right)^4}{E \cdot I} \quad (13)$$

5. Если задано время  $T$ , то требуемый шаг силовых точек в шве определяется из п. 4 как:

$$t_1 = \sqrt[4]{\frac{E \cdot I}{2 \cdot \mu} \cdot \left( \frac{S_0 + S_K}{b} \right)^3} \cdot \sqrt[4]{T} + a \quad (14)$$

На рис. 3-5 представлены графики, построенные на основании полученных зависимостей (13) и (14).

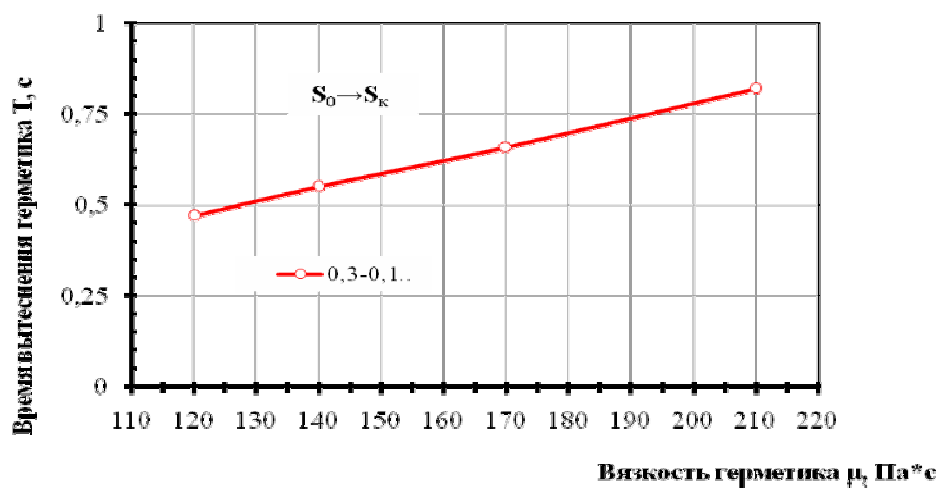


Рис. 3. Зависимость времени вытеснения герметика от величины вязкости герметика

Rys. 3. Zależność czasu wyciskania hermetyku od wartości jego lepkości

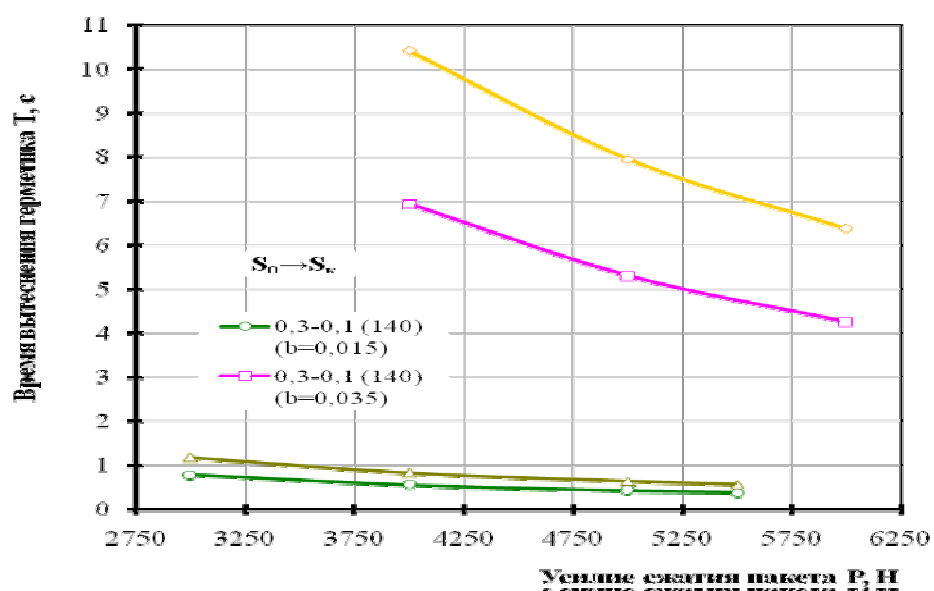


Рис. 4. Зависимость времени вытеснения герметика от усилия сжатия пакета

Rys. 4. Zależność czasu wyciskania hermetyku od siły ściskania pakietu

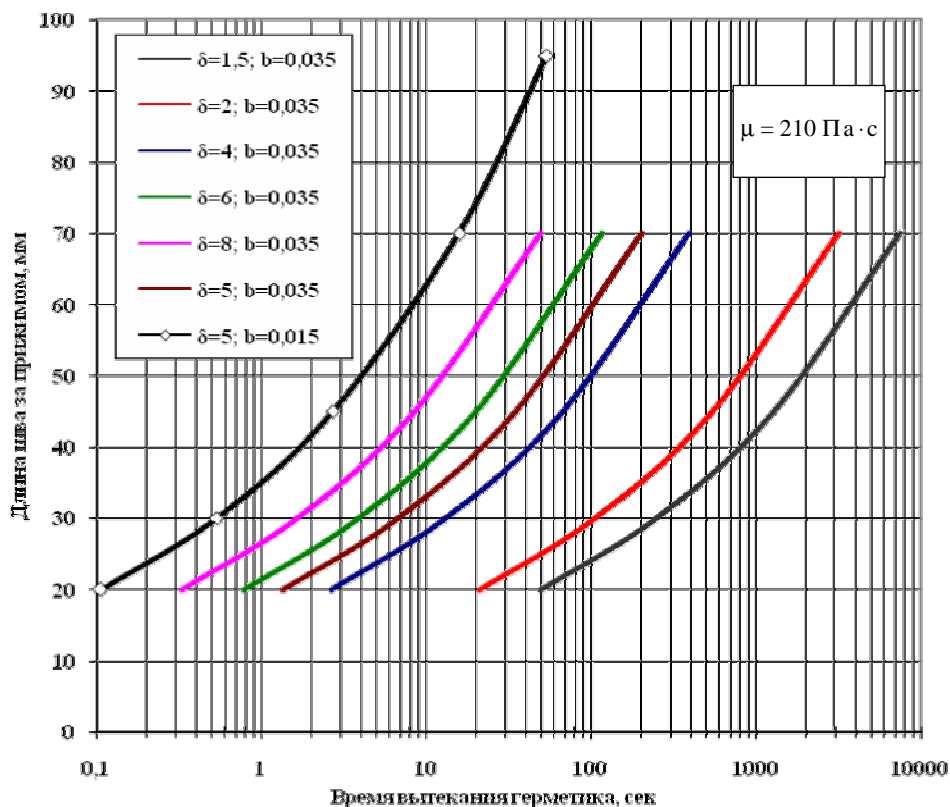


Рис. 5. Зависимость длины участка шва с вытесненным герметиком (меньше 0,2 мм) от времени выдержки для различной толщины обшивки

Rys. 5. Zależność długości odcinka szwu z wyciśniętym hermetykiem (mniejsza 0,2 mm) od czasu wytrzymania przy różnej grubości poszycia

Из графиков видно, что определяющее влияние на время вытеснения неотвещденного герметика из зоны шва оказывает параметр  $b$  – ширина полосы герметика в шве.

## NITOWANIE KONSTRUKCJI ZE SZWAMI STYKOWYMI I NIEUTWARDZONYM HERMETYKIEM WEWNĄTRZ SZWU

### Streszczenie

W artykule przedstawiono technologię montażu szwów w konstrukcjach lotniczych z wewnętrznym hermetykiem, których nitowanie celowo wykonuje się w okresie przed utwardzeniem hermetyku (w czasie jego żywotności).



---

## **STRUCTURAL ASSEMBLY BY RIVETING OF BUTT JOINTS WITH UNCURED SEAM SEALANT**

### **S u m m a r y**

Article covers joint assembly process for aviation structures with seam sealant, riveting of which is reasonable to fulfill while sealant is spreadable.

*Złożono w redakcji w lipcu 2011 r.*