

УДК 629.7.023

В.Е. Гайдачук, д-р техн. наук,
А.В. Кондратьев, д-р техн. наук,
О.А. Пронцевич, канд. техн. наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СКЛЕИВАНИЯ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Введение

Анализ накопленного отечественного и зарубежного опыта по созданию и эксплуатации различных высоконагруженных несущих агрегатов авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ) показал, что на сегодняшний день широко применяются сэндвичевые конструкции с композитными обшивками в сочетании с различными типами заполнителей, из которых наибольшее распространение получил сотовый [1 – 3]. Этот тип конструктивно-силовой схемы (КСС) позволяет реализовать одни из самых высоких показателей удельной прочности и жесткости при минимальной массе, являющейся определяющим критерием эффективности агрегатов рассматриваемого класса [4 – 6].

Ранее в рамках предложенной общей концепции оптимизации [7] был разработан комплексный подход к оптимальному проектированию несущих отсеков АРКТ [8], отличительной чертой которого является возможность многофакторной оптимизации параметров агрегатов рассматриваемого класса при обеспечении регламентированной несущей способности при одновременном силовом и тепловом нагружении с учетом технологических ограничений, соответствующих существующему уровню их производства. Известно, что при оптимальном проектировании и изготовлении агрегатов АРКТ необходимо обеспечить высокую прочность и надежность склеиваемых конструктивных элементов [9, 10]. Снижение поверхностной массы клея является одним из важнейших средств повышения совершенства сотовых конструкций (СК) агрегатов рассматриваемого класса [11, 12]. Однако, несмотря на большой опыт в области применения СК и их преимущества перед традиционными, сегодня прослеживается тенденция их замены на другие, что обусловлено недостаточной адгезионной связью несущих обшивок с СЗ [1, 11]. Поэтому необходимы надежные расчетные методы и методики определения несущей способности таких конструкций при условиях отрыва обшивок, предшествующие испытаниям образцов.

Постановка и решение задачи

В работе [13] проведено комплексное исследование зависимости несущей способности клеевого соединения обшивок сэндвичевых конструкций с СЗ от основных технологических способов нанесения клея в виде пленочного (сплошного) слоя (рис. 1, а) и адресного дозированного нанесения на торцы сотов (рис. 1, б), позволившее прогнозировать харак-

тер разрушения соединения в зависимости от параметров и свойств материала ячейки СЗ, а также клеевого слоя. Были установлены отличительные особенности поведения клеевых соединений с алюминиевой фольгой и полимерной бумагой Nomex под нагрузкой, которые необходимо учитывать при проектировании и производстве сотовых конструкций.

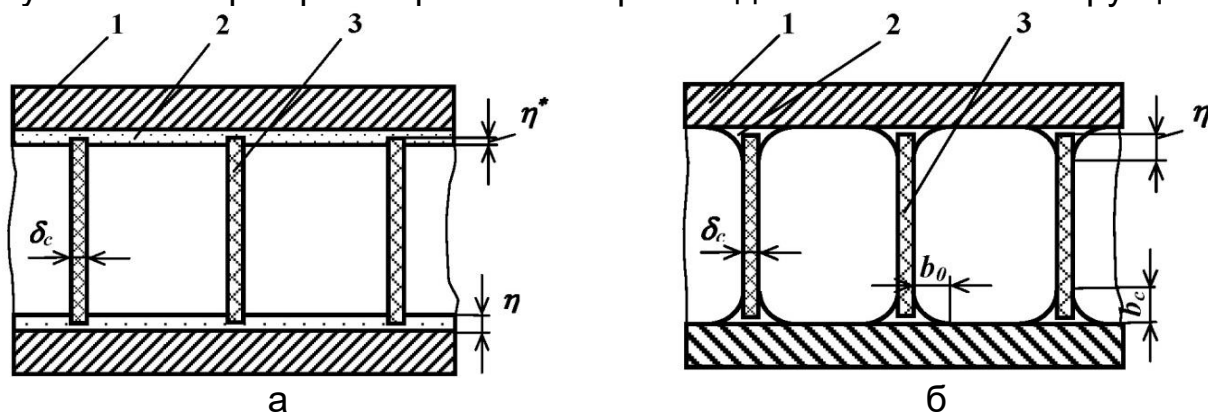


Рисунок 1 – Соединение СЗ с несущими обшивками сэндвичевой конструкции с помощью клеевой пленки (а) и клея, нанесенного на торцы сотов (б): 1 – обшивка, 2 – клеевая пленка (слой), 3 – грани сотов, δ_c – толщина грани СЗ, η – толщина клея, η^* – глубина проникновения торцов граней СЗ в клеевую пленку, b_c – клеевой катет на границе грани СЗ; b_0 – клеевой катет на границе обшивки

Ниже проведен анализ процесса формирования СК агрегатов рассматриваемого класса при адресном дозированном нанесении клея на торцы СЗ и установлены его рациональные технологические параметры.

После нанесения клея на торцы СЗ и его сушки, на них образуется слой в сечении, имеющий приблизительно овалообразную форму (рис. 2). Такой СЗ устанавливают между отформованными обшивками. Склеивание обшивок осуществляется при некотором давлении $P_{форм}$ и температуре $T_{форм}$, при которой клей размягчается и обретает вязкость $\nu(T_{форм})$.

Процесс склеивания имеет продолжительность во времени $\tau_{форм}$, при истечении которого клей полностью отверждается, фиксируя глубину зазора между обшивкой и торцами граней СЗ.

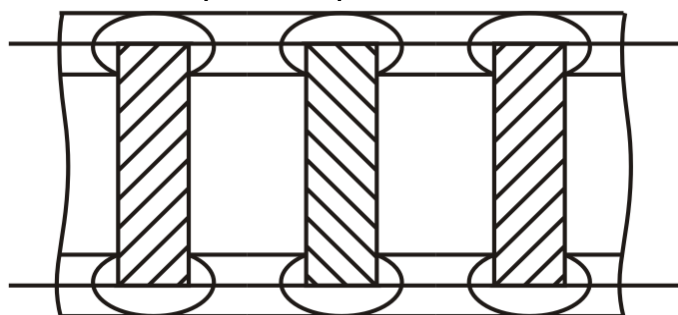


Рисунок 2 – Характер клеевого слоя при адресном дозированном нанесении на торцы сотов

Технологическими параметрами процесса склеивания СК являются:

- давление формования (склеивания) $p_{\text{форм}}$;
- вязкость клея $\nu(T_{\text{форм}})$, предопределяемая температурой процесса $T_{\text{форм}}$, необходимой и для последующей полимеризации клеевого соединения;*)
- время формования $\tau_{\text{форм}}$ **)

Для дальнейшего анализа приняты допущения о форме сечения клеевого слоя в момент приложения определяющего давления $p_{\text{форм}}$.

Будем считать, что в момент установления $T_{\text{форм}} = T_v$ и приложения давления $p_{\text{форм}}$ клей обретает вязкотекучее состояние и по месту контакта клеевого слоя с обшивкой наблюдается плоская площадка шириной δ_c (рис. 3).

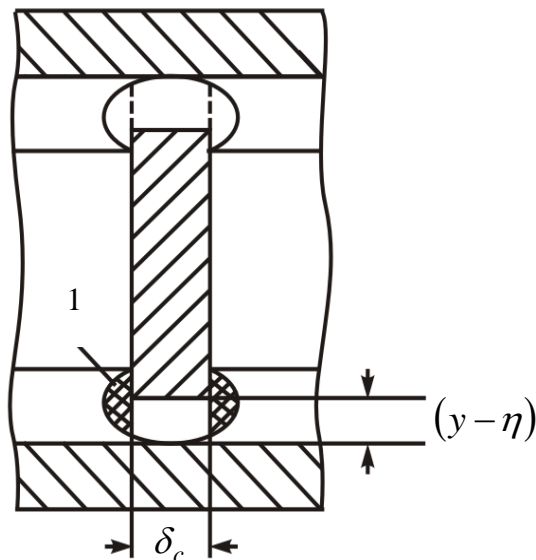


Рисунок 3 – Форма клеевого слоя в сечении в момент установления

$T_{\text{форм}}(T_v)$ и приложения давления $p_{\text{форм}}$

1 – клеевой слой; $(y - \eta)$ – глубина зазора между торцом грани СЗ и обшивкой СК

*) Возможна необходимость двух уровней температур: T_v , обеспечивающий вязкотекучесть подсушенного клея и $T_{\text{пол}}$, обеспечивающий полную полимеризацию соединения ($T_{\text{пол}} > T_v$). Температура $T_{\text{пол}}$ регламентируется маркой клея.

**) Возможна необходимость двух уровней времени формования: $\tau_{\text{форм1}}$, обеспечивающий необходимый зазор между обшивкой и торцами СЗ и $\tau_{\text{форм2}}$, обеспечивающий процесс полимеризации при $T_{\text{пол}}$.

Пренебрегая деформированием боковых участков клеевого слоя 1 (рис. 3), воспользуемся математической моделью сближающихся со скоростью v_0 двух абсолютно жестких поверхностей, из-под которых вытекает несжимаемая жидкость с вязкостью $\nu(T_{\text{форм}})$, сжимаемыми предварительно найденным давлением $p_{\text{форм}}$ (рис. 4).

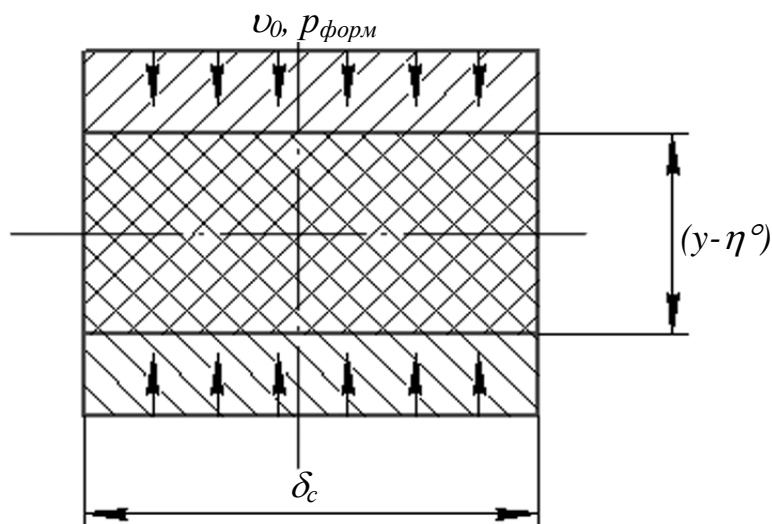


Рисунок 4 – Математическая модель формования СК с адресным дозированным нанесением клея на торцы сотов

Для определения допустимого уровня $p_{\text{форм}}$ СК рассмотрим элемент СЗ с сотами в общем случае неправильной шестигранной ячейкой с углом раскрытия β , стороной ячейки a_s и боковыми сторонами Ka_s (рис. 5).

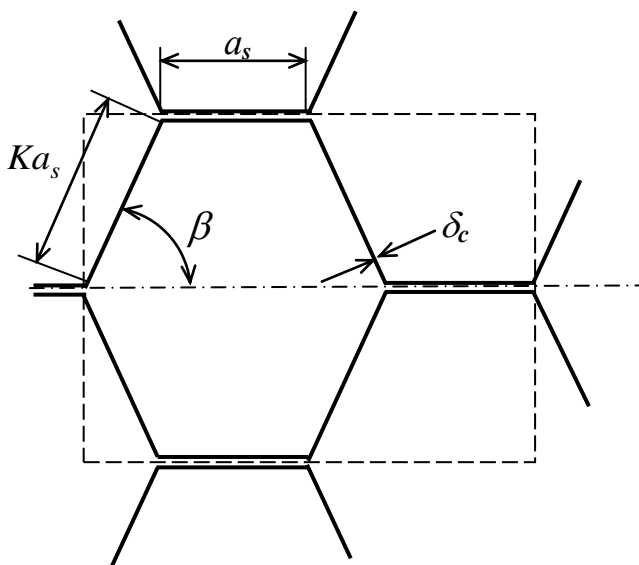


Рисунок 5 – Типовой элемент сотового блока с ячейкой неправильной шестигранной формы

Будем считать, что давление $p_{\text{форм}}$ является первопричиной нормальных и касательных напряжений в области клеевого соединения [13]. Это давление действует на площади сотоблока (рис. 5)

$$F_{\text{сб}} = 4a_s^2 K(K \cos \beta + 1) \sin \beta. \quad (1)$$

На торцы материала сотов и на клей в пределах сотоблока действует сила

$$P_{\text{сб}} = F_{\text{сб}} p_{\text{вн}}. \quad (2)$$

В материале сотов возникают напряжения

$$\sigma_{\text{сз}} = \frac{P_{\text{сб}}}{\delta_c I_{\text{клш}}} = \frac{F_{\text{сб}} p_{\text{вн}}}{\delta_c I_{\text{клш}}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{клш}}$ – периметр клеевого шва в пределах сотоблока.

$$I_{\text{клш}} = 4a_s (K + 1). \quad (4)$$

С учетом (1), (2) и (4) напряжения в материале СЗ

$$\sigma_{\text{сз}} = \frac{p_{\text{вн}} a_s K(K \cos \beta + 1) \sin \beta}{(K + 1) \delta_c}. \quad (5)$$

Потребуем, чтобы напряжения в СЗ $\sigma_{\text{сз}}$ не превышали критических напряжений, действующих на одинарную грань соты шириной Ka_s и высотой СЗ h :

$$\sigma_{\text{сз}} \leq \sigma_{\text{кр}}. \quad (6)$$

Считая грань Ka_s шарнирно закрепленной по четырем кромкам, получим [14]:

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{\pi^2}{12} \frac{K^* E_c \delta_c^2}{(Ka_s)^2 (1 - \mu^2)} = 0,9 \frac{K^* E_c \delta_c^2}{(Ka_s)^2}, \quad (7)$$

где K^* – коэффициент, зависящий от условий закрепления грани СЗ шириной Ka_s и соотношения h/Ka_s ; E_c – модуль упругости материала СЗ; μ – коэффициент Пуассона (для металлов $\mu = 0,3$).

Для случая шарнирного опирания значения K^* в зависимости от отношения h/Ka_s приведены в табл. 1 [14].

В случае СЗ из ортотропных материалов (полимерной бумаги «Номех», стекло-, угле- и органопластиков) критические напряжения определяются при $h \geq Ka_s$ [15]:

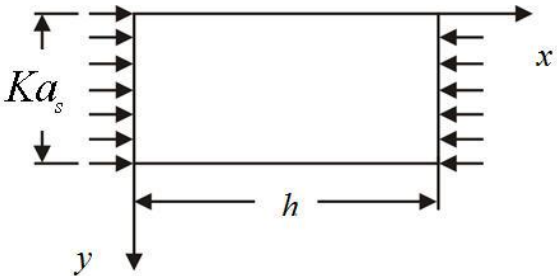
$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{2\pi^2 \sqrt{D_x D_y}}{(Ka_s)^2 \delta_c} \left(1 + \frac{D_{xy}}{\sqrt{D_x D_y}} \right), \quad (8)$$

где D_x, D_y, D_{xy} – цилиндрические жесткости пластины; δ_c – толщина грани СЗ (направление осей x и y см. табл. 1).

$$D_x = \frac{E_x \delta_c^3}{12(1 - \mu_{xy} \mu_{yx})}, \quad D_y = \frac{E_y \delta_c^3}{12(1 - \mu_{xy} \mu_{yx})}, \quad (9)$$

$$D_{xy} = D_x \mu_{yx} + \frac{G_{xy} \delta_c^3}{6} = \frac{\delta_c^3}{6} \left[\frac{E_x \mu_{yx}}{2(1 - \mu_{xy} \mu_{yx})} + G_{xy} \right].$$

Таблица 1 – Значения коэффициента K^* в формуле (7)



$\frac{h}{Ka_s}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
K^*	27	13,2	8,41	6,25	5,14	4,53	4,20	4,04	4,00	4,04
$\frac{h}{Ka_s}$	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	от 2 до ∞	
K^*	4,13	4,28	4,47	4,34	4,20	4,08	4,05	4,01	4,00	

Для металлического СЗ из условия (6) на основании (5) получим:

$$p_{вн} \leq \frac{1,8K^* E_c (K+1)}{(K \cos \beta + 1) \sin \beta} \cdot \frac{\delta_c^3}{(Ka_s)^3}. \quad (10)$$

В частном случае ячейки правильной шестигранной формы ($K=1$, $\beta=60^\circ$) вместо (10) будем иметь формулу:

$$p_{вн} \leq 2,08K^* E_c \left(\frac{\delta_c}{a_s} \right)^3. \quad (11)$$

Для СЗ из ортотропных материалов из условия (6) получим:

$$p_{вн} \leq \frac{1,56(K+1) \delta_c^3 \sqrt{E_x E_y}}{(K \cos \beta + 1) \sin \beta \cdot (1 - \mu_{xy} \mu_{yx}) (Ka_s)^3} \times \left[1 + \frac{E_x \mu_{yx} + 2G_{xy} (1 - \mu_{xy} \mu_{yx})}{\sqrt{E_x E_y}} \right] \quad (12)$$

или соответственно в частном случае ячейки правильной шестигранной формы:

$$\rho_{вн} \leq 1,8 \left(\frac{\delta_c}{a_s} \right)^3 \frac{\sqrt{E_x E_y}}{(1 - \mu_{xy} \mu_{yx})} \left[1 + \frac{E_x \mu_{yx} + 2G_{xy} (1 - \mu_{xy} \mu_{yx})}{\sqrt{E_x E_y}} \right]. \quad (13)$$

Формулами (10) – (11) и (12) – (13) определяется $\rho_{форм}$ СК, которое будем использовать при реализации математической модели (рис. 3). Связь между $\rho_{форм}$, $\nu(T_{форм})$, скоростью вытекания клея из зазора между обшивками, торцом грани сотов $\nu_0 = \frac{(\eta - y)}{\tau}$ и шириной площадки δ_c , определяется формулой [16]:

$$\rho_{форм} = \frac{2\nu(T_{форм})\delta_c^3}{\tau_{форм} K a_s (y - \eta)^2}, \quad (14)$$

где $(y - \eta)$ – глубина зазора между торцом граней СЗ и обшивкой СК в момент времени $\tau_{форм1}$, при котором достигается минимальная вязкость $\nu(T_{форм})$ и начинается полимеризация, сопровождающаяся интенсивным ростом $\nu(T_{форм})$; $\rho_{форм}$ – давление формования, определяемое формулами (10) – (11) или (12) – (13) в виде равенства:

$$\rho_{вн} = \rho_{форм}. \quad (15)$$

Значение $\nu(T_{форм})$ и $\tau_{форм}$ определяются маркой клея.

Подставляя в (14) $\rho_{вн}$ любого из выражений (10) – (13) и решая его относительно времени $\tau_{форм}$, получим для случая СЗ из металлической фольги

$$\tau_{форм} = \frac{1,1\nu(T_{форм})(K \cos \beta + 1) \sin \beta \left(\frac{K a_s}{y - \eta} \right)^2}{K^* E_\phi (K + 1)} \quad (16)$$

или для случая ячейки правильной шестигранной формы

$$\tau_{форм} = \frac{0,96\mu(T_{форм}) \left(\frac{a_s}{b_c - \eta} \right)^2}{K^* E_\phi}, \quad (17)$$

где b_c – клеевой катет на границе грани СЗ; $(b_c - \eta)$ – зазор между торцом грани СЗ и обшивкой СК (рис. 6) в момент времени τ .

На рис. 6 пунктиром показана форма клеевого слоя на торцах СЗ в исходный момент τ_0 формирования клеевого соединения (рис. 3), когда вязкость клея равна $\nu_0(T_0)$ (T_0 – нормальная температура 20 °С).

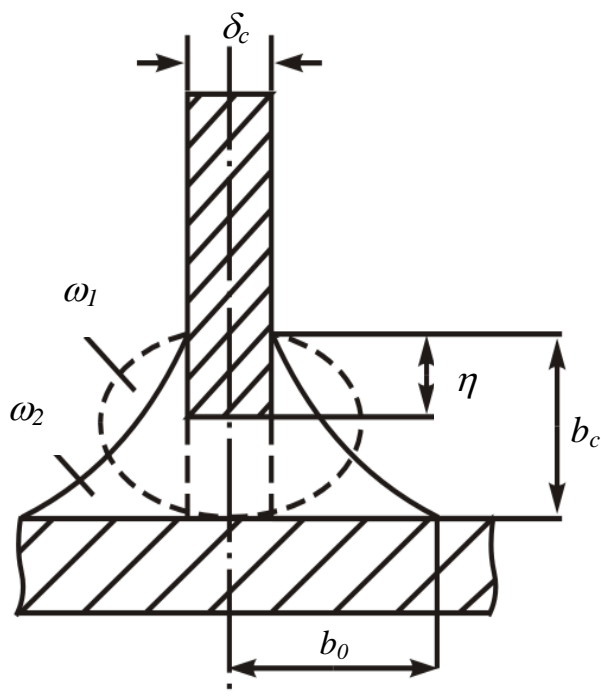


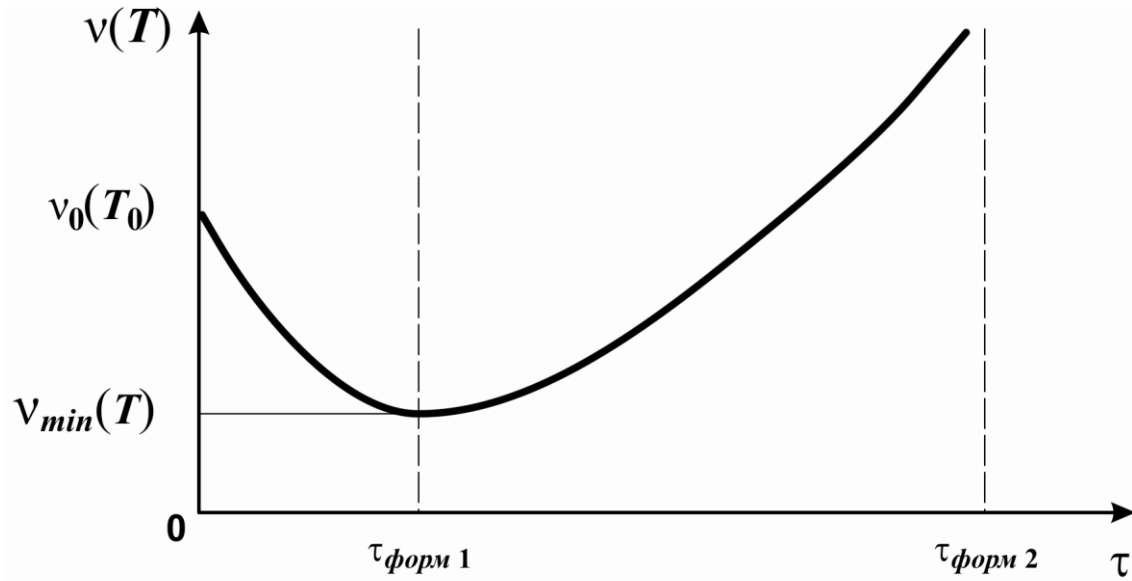
Рисунок 6 – Зазор между торцом грани СЗ с обшивкой СК в любой момент времени τ

Принято допущение, что в процессе подъема температуры до $T_{форм}$ происходит размягчение клеевого слоя, его растекание и обретение им конечной формы в момент времени $\tau_{форм1}$.

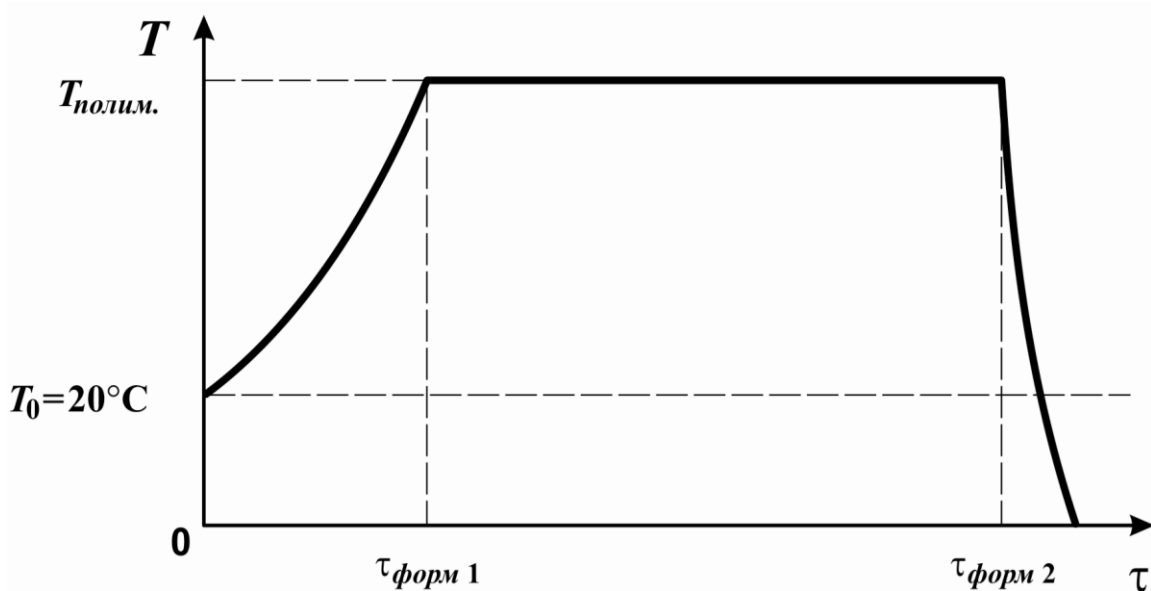
При этом $v_{\tau_{форм1}} = v_{min}$, а в последующее время $\tau > \tau_{форм1}$ начинается нарастающий процесс полимеризации клея и при $\tau = \tau_{форм2}$ наблюдается его завершение, при котором клей обретает свойства упругого тела, у которого вязкость соответствует теоретически бесконечности. При этом в момент $\tau_{форм1}$ форма клеевого слоя такова, что площади его сечения на рис. 6 вследствие гипотезы несжимаемости $\omega_1 = \omega_2$, а границами растекания клея являются катет, примыкающий к грани СЗ b_c и катет, примыкающий к обшивке b_0 [16].

Вязкость клея в течение времени формирования клеевого соединения меняется, как показано на рис. 7, а. На рис. 7, б показан характер изменения температуры формирования клеевого соединения.

Значение вязкости $v_0(T_0)$ и v_{min} и длительность процесса полимеризации $\tau_{форм2}$ определяется маркой клея. Допустимый уровень несущей способности клея определяется приближенно по формулам (16) – (17), исходя из длительность времени $\tau_{форм1}$, определенном по формулам (10) – (13) при фиксированном значении $(b_c - \eta)$.



а



б

Рисунок 7– Характер изменения вязкости (а) и температуры (б) клеевого слоя в процессе формирования клеевого соединения СК

В табл. 2 – 3 приведены технологические характеристики различных связующих, полученных разными авторами и обобщенными в монографии [17].

Правомерна обратная постановка задачи, заключающаяся в определении зазора между обшивками и торцами СЗ при $\tau_{\text{форм}2}$ из формулы (17):

$$(b_c - \eta)_{\min} = \sqrt{\frac{0,96 v_{\max}(T_{\text{форм}}) a_s^2}{K^* E_c \tau_{\text{форм}2}}}, \quad (18)$$

где $v_{\max}(T_{\text{форм}})$ – вязкость при $T = T_{\text{полим.}}$.

Таблица 2 – Оптимальные вязкости термореактивных связующих и уровень оптимальных давлений, прикладываемых в момент их гелеобразования для различных технологических процессов [17]

Технологический процесс	Вязкость связующего, Па·с	Давление, МПа
Пропитка под давлением	до 0,5	до 0,1
Центробежное формование, литьевое прессование (RTM)	0,1– 0,3	низкое
Пултрузия	0,4 – 0,8	0,2 – 5,0
Роллрузия	0,5 – 1,0	до 30,0
Намотка жидкофазная (использование растворов связующих)	0,1 – 1,0	0,05 – 1,0
Намотка твердофазная (использование расплавов связующих)	0,8 – 2,0	1,0 – 3,0
Вакуумное формование	2,0 – 5,0	1,0
Термокомпрессионное формование	0,5 – 1,0	1,0 – 1000
Автоклавное формование	3,0 – 5,0	1,0 – 5,0
Прессование	8,0 –9,0 (до 100)	0,5 – 100
Спекание	107,0 – 109,0	1000 и выше

Таблица 3 – Вязкость термореактивных связующих на стадиях пропитки и формования [17]

Тип связующих	Вязкость ¹⁾ при пропитке при 20 °С, Па·с	Вязкость при формовании, Па·с
Олигоэфирные стиролсодержащие	1 (25% стирола); 0,5-2,5 (28-45% стирола)	1,0 – 2,0
Эпоксидные	0,1 – 1,0	1,0 – 5,0
Эпоксифенольные	до 0,1·10 ³	3,0 – 10,0
Фенолальдегидные (40–60%-ные растворы)	0,04 – 10,0	10,0 ³ – 10,0 ⁵
Мелеинимидные (растворы)	0,5 – 2,5	1,5 – 10,0 ⁴ (при 150 – 100 °С)
Расплавы имидных олигомеров из смесей мономеров: АПИ-2,3	1,0 – 2,5	10,0 ³ – 10,0 ⁵ (при 270 – 220 °С) ²⁾
PMR-15	–	10,0 ⁵ – 10,0 ⁶ (при 320 – 300 °С) ³⁾

Примечания. ¹⁾ Оптимальная вязкость связующих на стадии пропитки 0,1 – 1,0 Па·с (15 – 85 с по ВЗ-4); ²⁾ вязкость расплавов олигоимидов; ³⁾ в области гелеобразования.

Предварительные расчеты по формуле (17) при значениях входящих параметров $E_c = 70$ ГПа, $a_s = 5$ мм, $K^* = 4$ и $0,03 \leq (b_c - \eta) \leq 0,18$ мм, соответствующей несущей способности клеевого соединения при трансверсальном отрыве обшивок для высоко- и низкомодульных клеев при любых значениях вязкости от 10 Па·с до 10^5 Па·с свидетельствуют, что временной интервал $\tau_{форм1}$ длится мгновенно и не может быть отслежен на практике. А давление формования соединения, определяемое формулами (10) – (13), является информативным параметром, который обязательно должен учитываться на практике в процессе формования клеевого соединения.

Принимая в (11) $K^* = 4$, $E_c = 71$ ГПа, $\delta_c = 0,03$ мм, $a_s = 5$ мм, получим $p_{форм} \leq 0,125$ МПа, что значительно ниже, чем уровень оптимальных давлений для склеивания панелей СК (табл. 2.) лежащий в диапазоне от 0,5 МПа.

Аналогично потребное давление $p_{форм}$ для случая склеивания клеевого соединения СЗ с обшивками СК через клеевую пленку определяется формулами (11) – (14) на основании неравенства (6).

Формулы для определения $\tau_{форм}$ в виде (16) – (17) с заменой $(b_c - \eta)$ на $(\eta - \eta^*)$ (рис. 1) или глубины зазора $(\eta - \eta^*)$ в виде (18) будут вносить большую погрешность, чем в случае адресного дозированного нанесения клея на торцы сотов, т.к. в случае пленочного клея, выдавливаемый из-под торцов граней СЗ слой встречает сопротивление недеформированной клеевой массы, которая отсутствует в предыдущем случае.

Предварительные расчеты учета этого сопротивления в виде противодавления $\frac{\rho_\eta V_x^2}{2}$ (ρ_η – плотность клея, V_x – скорость перемещения клеевого слоя в направлении вытекания клея) показывают, что временной интервал $\tau_{форм1} \rightarrow 0$ и величину зазора регулировать практически невозможно.

Выводы

Предложены технологические способы приближенной реализации рациональных параметров клеевых соединений СЗ с обшивками:

– допустимого уровня давления формования, обеспечивающего отсутствие потери устойчивости в элементах ячейки СЗ на основе алюминиевой фольги и полимерного композита, которое, значительно ниже, чем имеющее место в данном технологическом процессе;

– длительность формования СК при допустимом уровне давления, минимальной вязкости клея и фиксированном значении зазора между обшивками и торцами ячейки СЗ;

– временной интервал процесса формования, при котором температура достигает значения, потребного для полимеризации клея, а его вязкость становится минимальной, вследствие малой продолжительности интервала, не может быть регламентирован на практике. Однако, величина зазора при контрольных замерах не должна быть меньше рекомендованного значения относительной глубины проникновения торцов граней СЗ в клеевую пленку $\bar{\eta} = 0,5$ как для пленочного (сплошного) клеевого слоя, так и для его адресного дозированного нанесения на торцы сотов.

Список использованных источников

1. Баранников А.М. Опыт применения сотовых конструкций в изделиях «АН» [Текст] / А.М. Баранников, О.В. Мирошников, Г.В. Неминский, В.С. Петропольский, Н.И. Рубан // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (49). – Х., 2007. – С. 9 – 16.

2. Анализ номенклатуры типовых композитных агрегатов ракет космического назначения и применяемых для них конструктивно-силовых схем [Текст] / А.В. Кондратьев, А.Г. Дмитренко, К.Д. Стэнилэ, А.А. Царицынский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (79). – Х., 2014. – С. 19 – 30.

3. Хмельницкий, А.К. Опыт применения конструкций из полимерных композиционных материалов с сотовым наполнителем и наукоемких технологий в изделиях авиационно-космической техники [Текст] / А.К. Хмельницкий, Н.В. Мухин // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов V междунар. науч.-практ. конф., Днепропетровск 5-7 июня 2013 г. – Днепропетровск, 2013. – С. 246 – 247.

4. Минимизация массы оболочковых конструкций для изделий ракетно-космической техники [Текст] / Ю.Г. Артеменко, В.И. Сливинский, Ф.М. Телевной и др. // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов III междунар. науч.-практич. конф., Днепропетровск 27-29 мая 2009 г. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2009. – С. 36 – 38.

5. Vibro-acoustic Analysis of the Brazilian Vehicle Satellite Launcher (VLS) fairing [Текст] / Rogerio Pirk, Wim Desmet, Bert Pluymers, Paul Sas, Luis C. S. Goes // PROCEEDINGS OF ISMA 2002. – Vol. V. – P. 2075 – 2083.

6. New concept for weight optimization of launcher nose firings made of honeycomb structures [Электронный ресурс] / V. Slyvyns'kyu, M. Slyvyns'kyu, A. Gajdachuk и др. // 57th International Astronautical Congress 2006 – Valencia, Spain – IAC-06-C2.P.1.11. – P.1 – 5. – 1 электрон. опт. диск.

7. Кондратьев А.В. Концепция оптимального проектирования изделий авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Кондратьев // Системные технологии. – 2011. – №. 4 (75). – С. 28 – 34.

8. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных отсеков авиакосмической техники и их соединительных узлов [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.): Д401–15/2017-ф / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т»; рук. А. Гайдачук; отв. исполн. А. Кондратьев; исполн. В. Гайдачук, В. Коваленко, Я. Карпов, Ф. Гагауз, М. Шевцова [и др.] – Х., 2017. – Этап 1. – 147 с. – № ГР 0117U002499.

9. Karl-Alex Olsson Sandwich Constructions – Design and Experience [Text] / Olsson Karl-Alex; ed. J. R. Vinson. – Publ. Technomic Publ. Company: Stockholm, 1999. – 214 p.

10. Дегтярев, А.В. Трехслойные сотовые конструкции ракетно-космического назначения: материаловедческие, технологические и производственные аспекты [Текст] / А.В. Дегтярев, А.М. Потапов, В.А. Коваленко // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов V междунар. науч.-практ. конф., Днепропетровск 5-7 июня 2013 г. – Днепропетровск, 2013. – С. 101 – 109.

11. Astrom B.T. Sandwich Manufacturing: Past, Present and Future [Текст] / B.T. Astrom; ed. J .R. Virson. – Publ. Technomic Publ. Company: Stockholm, 1999. – 198 p.

12. Создание рационального клеевого соединения сотовых заполнителей с обшивками в конструкциях авиационно-космического назначения [Текст] / В.И. Сливинский, В.Е. Гайдачук, Г.В. Ткаченко, О.А. Карпикова // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск: ООО ПКФ «Арт-пресс», 2009. – С. 148 – 155.

13. Зависимость несущей способности сотовых конструкций при трансверсальном отрыве от технологии склеивания обшивок с заполнителем [Текст] / В.Е. Гайдачук, О.А. Карпикова, А.В. Кондратьев, В.В. Кириченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 2(89). – С. 5 – 17.

14. Прочность, устойчивость, колебания [Текст]: справ. / под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – Т.2. – 463 с.

15. Vasiliev V.V. Advanced Mechanics of Composite Materials [Текст] / V.V. Vasiliev, E.V. Morozov. – Elsevier, 2007. – 504 p.

16. Огурек О.Н. О выборе параметров клея для сотовых конструкций [Текст] / О.Н. Огурек, Л.М. Стариков, В.Г. Бондарь // Вопросы оптимизации тонкостенных силовых конструкций: сб. науч. трудов Харьк. авиацион. ин-та. – Вып. 3. – Х.: ХАИ, 1977. – С. 73 – 79.

17. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю.А. Михайлин. – СПб: Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.

Поступила в редакцию 13.06.2018.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Бычков,
ГП «Антонов», г. Киев.*