

УДК 629.7.023

В.Е. ГАЙДАЧУК, О.А. КАРПИКОВА, В.В. КИРИЧЕНКО, А.В. КОНДРАТЬЕВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ЗАВИСИМОСТЬ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ТРАНСВЕРСАЛЬНОМ ОТРЫВЕ ОТ ТЕХНОЛОГИИ СКЛЕИВАНИЯ ОБШИВОК С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ**

Проведен анализ несущей способности трехслойных конструкций летательных аппаратов, подверженных воздействию внутреннего давления, с сотовым наполнителем из алюминиевой фольги и полимерной бумаги, присоединенным к несущим обшивкам с помощью клеевой пленки или адресного нанесения клея на торцы сотов в широком диапазоне его физико-механических характеристик. Полученные результаты свидетельствуют о существенной зависимости уровня несущей способности клеевой галтели от глубины проникновения торцов сотов в клей. Показана возможность экономии энергетических ресурсов, расходуемых в процессе сборки-склейки конструкций исследуемого вида.

Ключевые слова: *трехслойные конструкции, внутренне давление, трансверсальный отрыв обшивок, сотовый наполнитель, клеевая пленка, адресное нанесение клея, клеевая галтель, несущая способность, сборка-склейка.*

Состояние проблемы

Трехслойные сотовые конструкции широко применяются в агрегатах авиакосмической техники вследствие высокого весового совершенства и других преимуществ по сравнению с другими конструктивно-технологическими решениями [1 – 4].

Однако их несущая способность при трансверсальном отрыве обшивок от сотового наполнителя (СЗ) существенно зависит от технологии их склеивания.

Существует два различных способа нанесения клеевого слоя на обшивки. Чаще всего клей наносится напылением из раствора или расплава на торцы СЗ, а также используются готовые клеевые пленки [1, 5]. В зависимости от технологии нанесения клеевая пленка или слой имеют различную толщину, что позволяет получить трехслойные конструкции с различной поверхностной массой.

Вторым весьма перспективным способом является нанесение клея на торцы сотов [6 – 8].

Снижение поверхностной массы является одним из важнейших средств повышения совершенства трехслойных конструкций, в особенности космического назначения: панелей солнечных батарей [9] и других агрегатов. Однако уменьшение наноса клея приводит и к снижению несущей способности изделия. Поэтому необходимы надежные расчетные методы и методики определения несущей способности трехслойных конструкций при условиях отрыва обшивок, предшествующие испытаниям образцов, аналогичные существующим для случая нанесения

клея на торцы сотов [6, 7]. В связи с этим представляется актуальной задача определения несущей способности клеевого соединения СЗ с обшивками в трехслойных конструкциях. В процессе производства соединений СЗ с обшивками жидкими или пленочным клеем толщиной $\eta_{кл}$ в зависимости от давления формования панели имеет место различная относительная глубина проникновения торцов граней СЗ в клеевую пленку $\bar{\eta} = \eta^* / \eta_{кл}$ ($0 \leq \bar{\eta} \leq 1$) (рис. 1, а).

В работе [6], а затем в обобщающей ее работе [7] были представлены методики анализа несущей способности клеевых соединений с нанесенным на торцы СЗ клеем. Однако предложенные в [6] и [7] аналитические методики построены на реализации приближенных математических моделей, основанных на определении максимальных эквивалентных напряжений σ_v^{\max} по Мизесу при использовании их средних составляющих, действующих на нормальной площадке клеевой галтели единичной ширины.

Анализ результатов наших исследований [10, 11] показал, что использование средних напряжений при определении несущей способности по аналитическим математическим моделям в аналогичных соединениях с непрерывным клеевым слоем (или пленкой) приводит к существенным погрешностям в сторону их занижения по сравнению с рассчитанными в пакете методом конечных элементов (МКЭ). Кроме этого использование МКЭ позволило выявить влияние и глубины проникновения торцов граней СЗ в клеевой слой на несущую способность

соединения и тем самым исследовать возможность определенной экономии энергетических ресурсов, расходуемых в процессе сборки-склейки конструкций рассматриваемого типа [9, 10].

В связи с изложенным выше в данной статье будет приведен поверочный расчет клевого соединения СЗ с несущими обшивками при адресном нанесении клея на торцы сотов в пакете МКЭ (рис. 1, б).

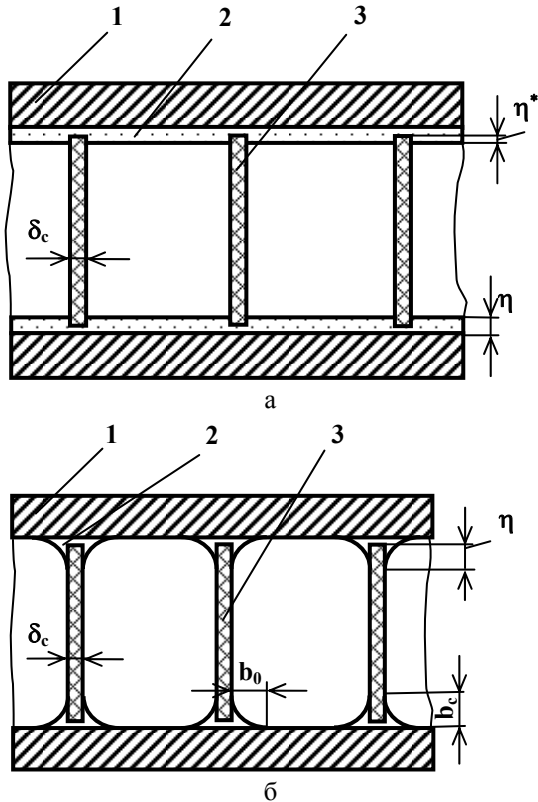


Рис. 1. Соединение СЗ с обшивками трехслойной конструкции с помощью клеевой пленки (а) и клея, нанесенного на торцы сотов (б): 1 – обшивка, 2 – клеевая пленка (слой); 3 – грани сотов

Результаты исследований

Рассмотрим первый способ нанесения клевого слоя (рис. 1, а).

Как и в работах [10, 11], в основу расчета положен типовой элемент сотового блока (рис. 2)

Площадь типового элемента сотового блока $F_{сб}$ равна

$$F_{сб} = 4a^2k(k \cos\beta + 1) \sin\beta . \quad (1)$$

На торцы фольги действует сила внутреннего давления $p_{вн}$ (или отсоса), равная

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

Под действием силы $P_{сб}$ в гранях СЗ возникают напряжения

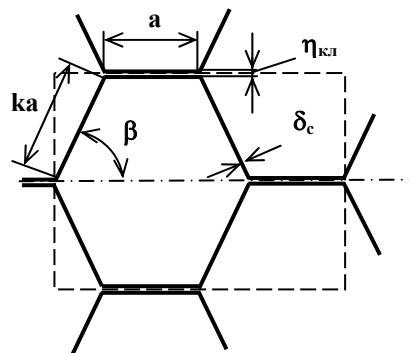


Рис. 2. Типовой элемент сотового блока с ячейкой неправильной шестигранной формы

$$\sigma_{СЗ} = \frac{P_{сб}}{\delta_c l_{клш}} , \quad (3)$$

где $l_{клш}$ – периметр клевого шва в пределах сотоблока

$$l_{клш} = 4a(k+1) . \quad (4)$$

С учетом (1), (2) и (4) $\sigma_{СЗ}$ будет равно

$$\sigma_{СЗ} = \frac{p_{вн} ak(k \cos\beta + 1) \sin\beta}{(k+1)\delta_c} . \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что $\sigma_{СЗ}$ тем больше, чем больше сторона ячейки СЗ при неизменных остальных параметрах. Для постоянного значения параметра $\frac{\sigma_{СЗ}\delta_c}{p_{вн}a}$ при любом значении угла раскрытия ячейки β наблюдается рост этого параметра при $k > 1$ (вытянутая ячейка) и его снижение при $k < 1$ (сплюснутая ячейка).

Из формулы (5) также следует, что предельное значение внутреннего давления получается при достижении предела прочности материала СЗ при растяжении

$$p_{вн\text{ пред}} = \frac{\sigma_{СЗ}\delta_c(k+1)}{ak(k \cos\beta + 1) \sin\beta} \quad (6)$$

или при исчерпании несущей способности клея.

Исследования проводились для СЗ из алюминиевой фольги и полимерной бумаги NOMEX.

Деформированное состояние области соединения граней алюминиевой фольги с клеевой пленкой представляет собой сложную картину распределения деформаций, выявляемых с помощью конечно-элементной модели в пакете МКЭ (рис. 3).

В связи с этим анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) по средним напряжениям растяжения $\sigma_{усп}$ и сдвига $\tau_{хусп}$ не может привести к удовлетворительным по точности результатам.

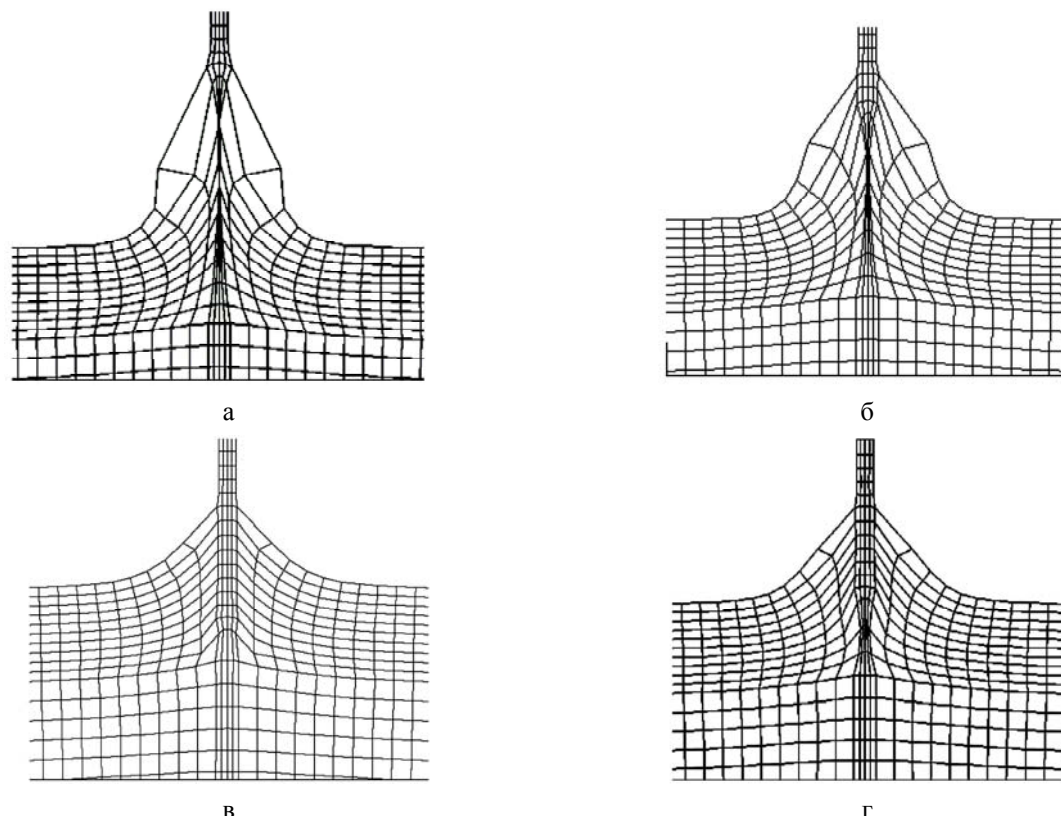


Рис. 3. Деформирование конечноэлементной модели фрагмента типового элемента сотового блока при нагружении внутренним давлением и параметрах: $\delta_\phi = 0,03$ мм; $\eta_{кл} = 0,12$ мм; $\delta_{общ} = 0,5$ мм; $b = 2$ мм;

$h = 1$ мм; $E_\phi = 70$ ГПа; $E_\eta = 7$ ГПа; $\sigma_\phi = 1$ МПа;

а – $\bar{\eta}^* = 0,1$; б – $\bar{\eta}^* = 0,3$; в – $\bar{\eta}^* = 0,7$; г – $\bar{\eta}^* = 0,9$

Поэтому в дальнейшем было проведено исследование НДС клеевого соединения с целью выявления уровня максимальных эквивалентных напряжений по условию Мизеса

$$\sigma_v^{\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2} \quad (7)$$

Исследование проводилось в пакете МКЭ для плоской деформации при напряжениях в фольге $\sigma_\phi = 1$ МПа для алюминиевой фольги толщиной $\delta_\phi = 30$ мкм с модулем упругости $E = 70$ ГПа при коэффициентах Пуассона фольги и клея $\mu_\phi = \mu_\eta = 0,3$ для клеев с модулями упругости $E_{\eta1} = 3,5$ ГПа, $E_{\eta2} = 7$ ГПа и $E_{\eta3} = 15,6$ ГПа и толщинах клеевого слоя $\eta = 0,05, 0,12, 0,2$ мм.

Распределение $\bar{\sigma}_v^{\max} = f(\bar{\eta}^*)$ при напряжениях в фольге $\sigma_\phi = 1$ МПа соответственно для $E_{\eta1}$, $E_{\eta2}$ и $E_{\eta3}$ приведены в табл. 1 и показаны на рис. 4, где сплошной линией показана аппроксимация точек

$\bar{\eta}^* = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$ и $0,9$ полиномом третьей степени.

Таблица 1

Распределение максимальных эквивалентных напряжений $\bar{\sigma}_v^{\max}$ при различных значениях относительной глубины проникновения торцов граней фольги в клеевой слой для разных модулей упругости и толщин клея

$\eta, \bar{\eta}^*$ мм	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	$E_\eta, \text{ ГПа}$
0,05	0,477	0,420	0,394	0,373	0,386	7
0,12	0,415	0,327	0,286	0,264	0,265	
0,2	0,346	0,264	0,220	0,196	0,191	
0,05	0,463	0,444	0,407	0,381	0,362	15,6
0,12	0,412	0,331	0,278	0,242	0,229	
0,2	0,352	0,253	0,212	0,204	0,200	
0,12	0,739	0,335	0,291	0,273	0,279	3,5

При низком модуле упругости наносимого (жидкого) клея типа ВК-32-200 и ВК-3, равном 7 ГПа и малом пределе прочности на разрыв

$\sigma_{в\eta}=15$ МПа аналитическая аппроксимация максимальных эквивалентных напряжений $\bar{\sigma}_v^{\max}$ соответствующих $\sigma_{\phi}=1$ МПа, для СЗ из алюминиевой фольги выражается формулами

$$\bar{\sigma}_{v\eta=0,05}^{\max} = 0,344\bar{\eta}^3 - 0,364\bar{\eta}^2 - 0,025\bar{\eta}^* + 0,453;$$

$$\bar{\sigma}_{v\eta=0,12}^{\max} = -0,250\bar{\eta}^3 + 0,727\bar{\eta}^2 - 0,687\bar{\eta}^* + 0,476; (8)$$

$$\bar{\sigma}_{v\eta=0,2}^{\max} = -0,260\bar{\eta}^3 + 0,707\bar{\eta}^2 - 0,664\bar{\eta}^* + 0,405.$$

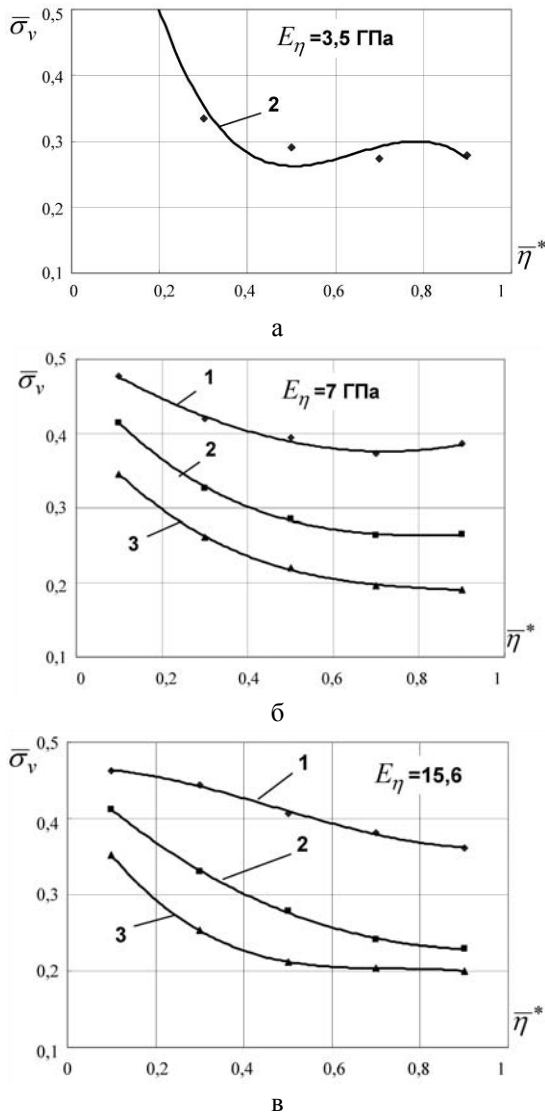


Рис. 4. Зависимость $\bar{\sigma}_v^{\max} = f(\bar{\eta}^*)$:

1 – $\eta=0,05$ мм; 2 – $\eta=0,12$ мм; 3 – $\eta=0,2$ мм для клеевых соединений СЗ из алюминиевой фольги с различными модулями упругости: а – $E_{\eta}=3,5$ ГПа; б – $E_{\eta}=7$ ГПа; в – $E_{\eta}=15,6$ ГПа

При высоком модуле упругости жесткого пленочного клея тина ВК-36, равном 15,6 ГПа и пределе прочности на разрыв $\sigma_{в\eta}=50$ МПа для этой же

фольги аппроксимации $\bar{\sigma}_v^{\max}$ выражаются формулами

$$\bar{\sigma}_{v\eta=0,05}^{\max} = 0,260\bar{\eta}^3 - 0,371\bar{\eta}^2 + 0,008\bar{\eta}^* + 0,466;$$

$$\bar{\sigma}_{v\eta=0,12}^{\max} = -0,252\bar{\eta}^3 + 0,351\bar{\eta}^2 - 0,533\bar{\eta}^* + 0,462; (9)$$

$$\bar{\sigma}_{v\eta=0,2}^{\max} = -0,563\bar{\eta}^3 + 1,242\bar{\eta}^2 - 0,920\bar{\eta}^* + 0,432.$$

Анализ графиков зависимостей (8) и (9) (рис. 4) позволяет сделать следующие выводы.

1. Как для низко модульных (рис. 4, а, б), так и для высоко модульных клеев максимальные эквивалентные напряжения имеют нелинейно убывающий характер по мере увеличения относительной глубины проникновения торцов сотов $\bar{\eta}^*$ в клеевой слой.*)

2. Относительное убывание составляет на участке $0,1 \leq \bar{\eta}^* \leq 0,7$ от $\Delta=18...22$ % для самого тонкого клеевого слоя до $\Delta=42...43$ % для предельно толстого, где $\Delta = \frac{\bar{\eta}_{0,1}^* - \bar{\eta}_{0,7}^*}{\bar{\eta}_{0,1}^*} \cdot 100$ % и практически

слабо зависит от модуля упругости клея.

3. Из п. 2 следует, что обеспечение заглубления торцов сотов в клеевую пленку соответствующими технологическими параметрами (температурой и (или) давлением в процессе склеивания СЗ с обшивками панели) позволяет повысить прочность на равномерный отрыв несущих слоев панели от сотов в среднем на 20 % для самых тонких клеевых пленок и на 42 % – для самых толстых клеевых пленок.

4. При назначении режима склеивания панели рационально выбирать уровень температуры и (или) давления, которые обеспечивают несущую способность изделия при глубине проникновения торцов сотов в клей не более чем $(0,5...0,6)\bar{\eta}^*$, что соответственно понижает энергозатраты технологического процесса.

5. Графики рис. 4 и табл. 1 позволяют прогнозировать характер исчерпания несущей способности соединения СЗ с обшивками (по клею или по сотам) в зависимости от предела прочности клея $\sigma_{в\eta}$.

Последний пункт нуждается в пояснении. Рассмотрим случай, когда напряжения в фольге достигают предела ее прочности при растяжении, что со-

) Исключение составляют кривые для низко модульных клеев, соответствующие толщинам клеевого слоя $\eta=0,12$ мм при $E_{\eta}=3,5$ ГПа и $\eta=0,05$ мм при $E_{\eta}=7$ ГПа, которые имеют тенденцию к слабому возрастанию при $\bar{\eta}^=0,7$. Объяснение этому факту требует дополнительного анализа.

ответствует внутреннему давлению в сотоблоке, определяемому формулой (6).

В силу решения задачи МКЭ в линейной постановке значения максимальных эквивалентных напряжений из таблицы или в формулах (8) и (9), которые получены при напряжениях в фольге $\sigma_{\phi}=1$ МПа, необходимо умножить на величину, определяемую формулой (5).

Для обеспечения несущей способности клевого соединения полученные значения σ_v^{\max} должны быть меньше или равны пределу прочности клея при растяжении $\sigma_{v\eta}$.

В качестве примера рассмотрим СЗ из алюминиевой фольги А5Т с характеристиками $\sigma_{v\phi}=120$ МПа, $E_{\phi}=70$ ГПа, $\delta_{\phi}=0,03$ мм, размером ячейки $a=6$ мм, углом раскрытия $\beta=60^\circ$ и $k=1$, приклеиваемой клеем ВК-36 с пределом прочности на растяжение $\sigma_{v\eta}=50$ МПа, модулем упругости $E_{\eta}=7$ ГПа с различными толщинами клеевой пленки 0,05; 0,12 и 0,2 мм.

В соответствии с табл. 1 получим для $\bar{\eta}^*=0,5$:

– при $\eta=0,05$ мм

$$\sigma_v^{\max} = \bar{\sigma}_v^{\max} \cdot \sigma_{v\phi} = 0,394 \cdot 120 = 47,2 < \sigma_{v\eta} = 50 \text{ МПа};$$

– при $\eta=0,12$ мм

$$\sigma_v^{\max} = 0,286 \cdot 120 = 34,3 < \sigma_{v\eta};$$

– при $\eta=0,2$ мм

$$\sigma_v^{\max} = 0,22 \cdot 120 = 26,4 < \sigma_{v\eta}.$$

Таким образом, при толщинах клея $0,12 \leq \eta \leq 0,2$ мм разрушение клевого соединения произойдет в результате разрыва фольги при внутреннем давлении или отсосе, равном в соответствии с (6) $p_{вн} = 0,92$ МПа. При $\eta=0,05$ мм возможно одновременное или смешанное разрушение панели,

так как $\sigma_v^{\max} = 47,2$ МПа в пределах разброса свойств близко к $\sigma_{v\phi} = 50$ МПа.

Таким образом приведенная выше методика позволяет с достаточной для практики точностью прогнозировать характер разрушения трехслойных конструкций с СЗ из алюминиевой фольги в зависимости от параметров ячейки, клевого слоя и ФМХ клея для заданной температуры и давления склеивания, определяющих ту или иную относительную глубину проникновения торцов СЗ в клеевой слой.

Для анализа несущей способности клевого соединения СЗ из полимерной бумаги NOMEX при трансверсальном растяжении с помощью численного эксперимента в пакете МКЭ были использованы характеристики бумаги NOMEX, приведенные в паспорте фирмы-производителя Du Pont (табл. 2).

Как и ранее, исследование напряженно-деформированного состояния клевого соединения проводилось путем вычисления максимального уровня эквивалентных напряжений по условию Мизеса для плоской деформации при напряжениях в фольге $\sigma_{\phi}=1$ МПа по формуле (7).

Исследования проводились в пакете МКЭ для бумаги NOMEX толщиной $\delta_c=0,056$ мм с модулем упругости $E_{nomex}=0,84$ ГПа при коэффициентах Пуассона бумаги и клея $\mu_{\phi} = \mu_{\eta}=0,3$ для двух клеев с модулями упругости $E_{\eta1}=15,6$ ГПа, $E_{\eta2}=7$ ГПа и толщинах клевого слоя $\eta_1=0,05$ мм, $\eta_2=0,12$ мм и $\eta_3=0,2$ мм.

Распределение $\bar{\sigma}_v^{\max} = f(\bar{\eta}^*)$ при напряжениях в фольге $\sigma_{\phi}=1$ МПа для $E_{\eta1}$ и $E_{\eta2}$ приведены в табл. 2 и показаны на рис. 5, где сплошная линия соответствует аппроксимация точек $\bar{\eta}^*=0,1; 0,3; 0,5; 0,7$ и $0,9$ полиномом третьей степени.

Таблица 2

Характеристики полимерной бумаги NOMEX BRANDT 412/0,05 мм

Свойства	max	min	средние	Метод испытаний ASTM
Толщина бумаги, мм	0,065	0,047	0,056	D 374
Базовый вес, г/м ²	44,1	35,9	40	D 646
Плотность, г/см ³	0,9	0,5	0,7	D 646
Погонная прочность при разрыве, Н/см				
- вдоль волокон	54,8	36,2	45,5	D 828
- поперек волокон	26,3	12,3	19,3	
Удлинение при разрыве, %				
- вдоль волокон	13,3	6,1	9,7	D 828
- поперек волокон	9,9	3,5	6,7	

Таблица 3

Распределение максимальных эквивалентных напряжений $\bar{\sigma}_v^{\max}$ (МПа) при различных значениях относительной глубины проникновения торцов граней полимерной бумаги в клеевой слой для разных модулей упругости

$\bar{\eta}^*$ η , мм	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	E_η , ГПа
0,05	1,320	1,328	1,285	1,252	1,452	7
0,12	0,688	0,839	0,941	0,975	1,000	
0,2	0,650	0,920	0,941	0,946	0,955	
0,05	2,080	2,180	2,110	1,986	2,330	15,6
0,12	0,738	1,050	1,048	1,043	1,061	
0,2	0,995	1,061	1,044	1,026	1,335	

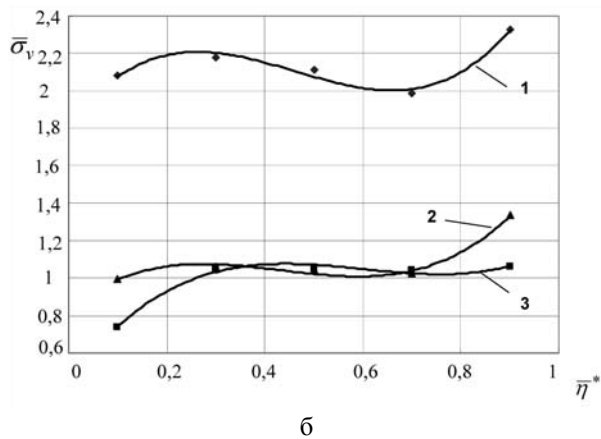
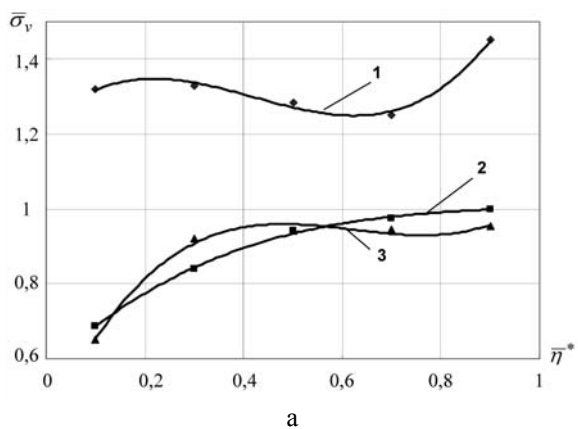


Рис.5. Зависимость $\bar{\sigma}_v^{\max} = f(\bar{\eta}^*)$:

1 – $\eta = 0,05$ мм; 2 – $\eta = 0,12$ мм; 3 – $\eta = 0,2$ мм для клеевых соединений СЗ из полимерной бумаги NOMEX с различными модулями упругости:
а – $E_\eta = 7$ ГПа; б – $E_\eta = 15,6$ ГПа

Анализ графиков рис. 5 позволяет сделать следующие выводы.

1. В отличие от клеевых соединений СЗ из алюминиевых сплавов в случае сотов из полимерной бумаги NOMEX, как для низко модульных, так и для высоко модульных клеев, максимальные эквивалентные напряжения имеют возрастающий характер

до относительной глубины проникновения торцов сотов в клеевой слой $\bar{\eta}^* = 0,3 \dots 0,5$ с последующим слабым или достаточно высоким градиентом возрастания от $\bar{\eta}^* = 0,7$ до $\bar{\eta}^* = 0,9$. Исключение составляет график изменения $\bar{\sigma}_v^{\max} = f(\bar{\eta}^*)$ для толщины клея $\eta = 0,12$ мм с низким модулем упругости.

2. Отмеченный в п. 1 типовой характер изменения $\bar{\sigma}_v^{\max} = f(\bar{\eta}^*)$ свидетельствует о рациональности формирования панелей с малой относительной глубиной проникновения торцов граней сотов в клеевой слой или во всяком случае выдерживания этого параметра на уровне не выше $\bar{\eta}^* = 0,7$ за исключением соединения с $\eta = 0,12$ мм и $E_\eta = 7$ ГПа.

3. Представляются весьма нерациональными по несущей способности соединения с предельно тонким клеевым слоем $\eta = 0,05$ мм как на низко модульном ($E_\eta = 7$ ГПа), так и на высоко модульном клее ($E_\eta = 15,6$ ГПа), для которых графики $\bar{\sigma}_v^{\max} = f(\bar{\eta}^*)$ во всем диапазоне $0,1 \leq \bar{\eta}^* \leq 0,9$ лежат в области $1,3 \leq \bar{\sigma}_v^{\max} \leq 2,3$.

4. Так как графики $\bar{\sigma}_v^{\max} = f(\bar{\eta}^*)$ практически для всего диапазона клеев и толщин клеевого слоя, за исключением узкого диапазона $0,1 \leq \bar{\eta}^* \leq 0,3$ с $E_\eta = 7$ ГПа и $0,1 \leq \bar{\eta}^* \leq 0,2$ с $E_\eta = 15,6$ ГПа, лежат в области $\bar{\sigma}_v^{\max} > 1$, то разрушение соединения всегда будет иметь место по клеевому слою вследствие того, что $\sigma_v^{\max} = \bar{\sigma}_v^{\max} \cdot \sigma_{v\text{номех}} \geq 1,81$ МПа, то есть существенно выше как предела прочности на отрыв слабого клея ($\sigma_{v\eta} = 15$ МПа), так и сильного ($\sigma_{v\eta} = 50$ МПа).

Таким образом, клеевые соединения трехслойных панелей с СЗ из полимерной бумаги NOMEX с приведенными выше ее характеристиками всегда будут разрушаться в случае равномерного отрыва обшивок при внутреннем давлении $p_{вн}$ СЗ с правильной шестигранной ячейкой ($k=1, \beta=60^\circ, a=6$ мм, $\delta_{\text{номех}} = 0,056$ мм), равном $p_{вн} = 0,485$ МПа при $\sigma_{v\eta} = 15$ МПа и $p_{вн} = 0,72$ МПа при $\sigma_{v\eta} = 50$ МПа.

5. При значениях $k > 1$, как отмечалось выше, параметр $\frac{\sigma_{\text{номех}} \delta_c}{p_{вн} a}$ будет увеличиваться, т.е. при $\delta_c / p_{вн} a = \text{const}$ будет расти максимальное эквивалентное напряжение, соответствующее условию

Мизеса, что усиливает реализацию разрушения соединения панели по клею.

При значениях $k < 1$ при прежних условиях возможность реализации характера разрушения соединения панели по клею несколько снижается, а при малых значениях угла раскрытия ячейки СЗ и малых k , по-видимому, возможно достижение одновременного разрушения соединения по полимерной бумаге и клею.

6. Полимерная бумага NOMEX является ортотропным материалом (см. табл. 2). Проведенный выше числовой анализ выполнен для случая формирования граней ячеек СЗ из бумаги NOMEX вдоль волокон, прочность которой на разрыв при пересечении с погонной, равной 45,5 Н/см на предел прочности составляет $\sigma_{\text{в номех}} = 81$ МПа, а модуль ее упругости, определенный как

$$E_{\text{номех}} = \frac{\sigma_{\text{номех}}}{\epsilon_{\text{пред}}} = 840 \text{ МПа.}$$

Если же формирование граней ячейки СЗ производится поперек волокон бумаги, то реализуются характеристики бумаги $\sigma_{\text{в номех}} = 34$ МПа и модуль упругости $E_{\text{номех}} = 507$ МПа.

При этих значениях ФМХ вполне возможно разрушение клеевого соединения по СЗ.

7. Как следует из табл. 2, поставляемая полимерная бумага имеет существенный разброс свойств относительно их среднего значения по толщинам (32%), $\sigma_{\text{в номех}}$ (12...40%), $\epsilon_{\text{пред}}$ (74...96%) и $E_{\text{номех}}$ (66...129%).

При столь больших разбросах существует реальная возможность существенных погрешностей при определении в пакете МКЭ максимальных эквивалентных напряжений в различных зонах клеевого соединения, и, как следствие, в ошибке прогноза характера его разрушения в соответствии с п. 4.

8. Практический интерес представляет также решение задачи выбора параметров технологического режима склеивания трехслойной конструкции, при которых с приемлемой точностью обеспечивается оптимальная глубина проникновения торцов граней СЗ в клеевой слой заданной толщины, давления склеивания и температуры, которые позволили бы реализовать данный режим с заданной скоростью протекания процесса склейки.

Решение данной задачи видится в применении математической модели и ее реализации, предложенной в работе [12].

Перейдем теперь к случаю нанесения клея на торцы граней СЗ.

Объем клея на единичной ширине торца грани соты в момент склеивания СЗ с обшивками, остава-

ясь постоянным, обретет в общем случае форму, показанную на рис. 6.

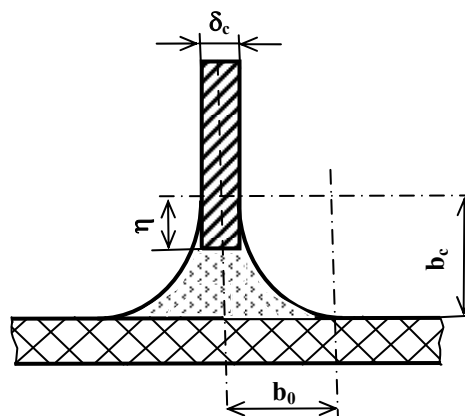


Рис. 6. Клеевая галтель в соединении СЗ и обшивки из различных материалов:
 b_c – клеевой катет на границе грани СЗ;
 b_0 – клеевой катет на границе обшивки

В [7] форма стекания капли клея с торца соты на поверхность обшивки в момент склеивания соединения из различных материалов принята в виде четверти эллипса, а соотношение катетов b_0 и b_c равным*)

$$\frac{b_c}{b_0} = \frac{\sigma_{\text{к-о}}(T_{\text{скл}}) \cdot \mu(T_{\text{скл}}) \cdot l_0(T_{\text{скл}})}{\sigma_{\text{к-с}}(T_{\text{нк}}) \cdot \mu(T_{\text{нк}}) \cdot l_{\text{сз}}(T_{\text{нк}})} = \zeta_{\sigma, \mu}, \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{к-с}}(T_{\text{нк}})$, $\sigma_{\text{к-о}}(T_{\text{скл}})$ – поверхностное натяжение клея на границе «клей – сота» при температуре нанесения клея на торцы сотов и на границе «клей – обшивка» при температуре склеивания соединения;

$\mu(T_{\text{скл}})$, $\mu(T_{\text{нк}})$ – вязкость клея при температуре склеивания соединения и при температуре нанесения клея на торцы сотов;

$l_0(T_{\text{скл}})$, $l_{\text{сз}}(T_{\text{нк}})$ – периметры смачивания – линии, ограничивающие поверхность раздела фаз «клей – обшивка» при $T_{\text{скл}}$ и «клей – сота» при $T_{\text{нк}}$.

Так как объем клея с момента его нанесения на

*) Установить параметры, входящие в формулу (10), экспериментально достаточно сложно. Кроме того, на соотношение клеевых катетов b_c/b_0 могут влиять и другие факторы, не отраженные формулой (10). Поэтому, по-видимому, более надежным является экспериментальный замер под микроскопом непосредственно этих катетов для конкретного клея и материалов обшивки и сотов, постулируя, как и при обосновании зависимости (10) в [7], постоянство коэффициента пропорциональности $\zeta_{\sigma, \mu}$ между размерами катетов и соответствующими им параметрами поверхностного натяжения, вязкости клея и периметра смачивания. Этот путь представляется и более продуктивным для установления формы стекания капли, принятой здесь в виде четверти эллипса.

торцы сотов до окончательного формообразования соединения остается постоянным, то его значение в пределах типового сотовблока будет равно

$$V_{\text{клсб}} = 2F_{\text{клгал}}L_{\text{кш}}, \quad (11)$$

где $F_{\text{клгал}}$ - площадь клеевой галтели (рис. 6);

$L_{\text{кш}}$ - периметр клевого шва с учетом выделенного типового сотовблока. Коэффициент 2 в формуле (11) отражает факт нанесения клея на две поверхности торцов сотов.

$$L_{\text{кш}} = 2a(2k + 1); \quad (12)$$

$$F_{\text{клгал}} = 2 \left[\left(b_0 + \frac{\delta_c}{2} \right) b_c - \frac{\pi b_c b_0}{4} - \frac{\delta_c}{2} (b_c - \eta) \right] = 2 \left[0,43b_0 b_c + \frac{\delta_c}{2} (b_c - \eta) \right]. \quad (13)$$

Масса клея в пределах сотовблока равна

$$m_{\text{клсб}} = V_{\text{клсб}} \rho_{\text{кл}} = 3,44a\rho_{\text{кл}}(2k + 1) \left[b_c b_0 + 1,16\delta_c (\eta_c - \eta) \right], \quad (14)$$

где $\rho_{\text{кл}}$ - плотность клея.

Поверхностная масса клея, нанесенного на обе стороны СЗ, выражается соотношением

$$\bar{m}_{\text{кл}} = \frac{m_{\text{клсб}}}{F_{\text{сб}}} = \frac{1,72\rho_{\text{кл}}(2k + 1) \left[b_c b_0 + 1,16\delta_c (\eta_c - \eta) \right]}{ak(1 + 2k \cos \beta) \sin \beta}. \quad (15)$$

Подставляя в (15) соотношение (10) и разрешая его относительно катета b_0 , получим после преобразований

$$b_0 = 0,58\delta_c \times \left(1 + \frac{1}{\zeta_{\sigma,\mu} \delta_c^2} \left[\frac{1,73\bar{m}_{\text{кл}} ak(2k \cos \beta + 1) \sin \beta}{\rho_{\text{кл}}(2k + 1)} + \right] \right)^{\frac{1}{2}} - 0,58\delta_c. \quad (16)$$

Соответственно b_c будет равно

$$b_c = 0,58\delta_c \zeta_{\sigma,\mu} \times \left(1 + \frac{1}{\zeta_{\sigma,\mu} \delta_c^2} \left[\frac{1,73\bar{m}_{\text{кл}} ak(2k \cos \beta + 1) \sin \beta}{\rho_{\text{кл}}(2k + 1)} + \right] \right)^{\frac{1}{2}} - 0,58\delta_c \zeta_{\sigma,\mu}. \quad (17)$$

После установления размеров катетов клеевой галтели прежде, чем переходить к определению в ней напряженного состояния и несущей способности клея, необходимо установить ширину площади

сечения справа и слева от оси симметрии соединения QN, переходящую в QM при устремлении торцов граней СЗ к контакту с обшивкой, то есть при $\eta \rightarrow 0$ (рис. 7), на которой действуют максимальные эквивалентные напряжения, определяемые в соответствии с принятой теорией прочности [13].

Приняв для клея энергетическую теорию прочности, в соответствии с которой максимальные эквивалентные напряжения σ_v равны $\sqrt{\sigma_{\text{кш}}^2 + 3\tau_{\text{кш}}^2}$ получим

$$\sigma_v^{\text{max}} = \sqrt{\sigma_{\text{кш}}^2 + 3\tau_{\text{кш}}^2} \leq \sigma_{\text{вкл}}, \quad (18)$$

где $\sigma_{\text{вкл}}$ - предел прочности клея при растяжении.

Иными словами необходимо определить угол наклона ширины площадки OM к оси $x \gamma$, при котором проекция силы $\frac{P_{\text{сб}}}{2}$ от полной силы $P_{\text{сб}}$, разнесенной середины левой и правой стороны галтели, дадут составляющие, порождающие напряжения

$$\sigma_{\text{кш}} = \frac{P_{\text{сб}} \cos \gamma}{2c_{\text{max}} l_{\text{кш}}}, \quad \tau_{\text{кш}} = \frac{P_{\text{сб}} \sin \gamma}{2c_{\text{max}} l_{\text{кш}}}, \quad (19)$$

где c_{max} - ширина площадки клеевой галтели, на которой действуют максимальные эквивалентные напряжения (18).

С этой целью сначала необходимо определить координаты точки M в системе xoy (рис. 7).

Уравнение эллипса, часть которого является образующей галтели клея, имеет вид

$$\left(\frac{x - b_0}{b_0} \right)^2 + \left(\frac{y - b_c}{b_c} \right)^2 - 1 = 0. \quad (20)$$

Уравнение прямой ОК, на которой лежит точка M, замыкающая отрезок OM ширины площадки с, запишем в виде

$$y = x \operatorname{tg} \gamma. \quad (21)$$

Решая совместно уравнения (20) и (21), определим координату точки их пересечения M - x_M, y_M .

После ряда преобразований получим координаты точки M:

$$x_M = \frac{b_0 b_c}{b_c^2 + b_0^2 \operatorname{tg}^2 \gamma} \left(b_c + b_0 \operatorname{tg} \gamma - \sqrt{2b_0 b_c \operatorname{tg} \gamma} \right); \quad (22)$$

$$y_M = \frac{b_0 b_c \operatorname{tg} \gamma}{b_c^2 + b_0^2 \operatorname{tg}^2 \gamma} \left(b_c + b_0 \operatorname{tg} \gamma - \sqrt{2b_0 b_c \operatorname{tg} \gamma} \right).$$

Тогда длина отрезка OM определится как

$$OM = c = \sqrt{x_M^2 + y_M^2} = \frac{b_0 b_c}{b_c^2 + b_0^2 \operatorname{tg}^2 \gamma} \times \sqrt{\left[(b_c + b_0 \operatorname{tg} \gamma) - \sqrt{2b_0 b_c \operatorname{tg} \gamma} \right]^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma)}. \quad (23)$$

или с учетом (10)

$$c = \frac{b_0 \zeta_{\sigma, \mu}}{\zeta_{\sigma, \mu}^2 + \operatorname{tg}^2 \gamma} \left[(\zeta_{\sigma, \mu} + \operatorname{tg} \gamma) - \sqrt{2 \zeta_{\sigma, \mu} \operatorname{tg} \gamma} \right] \sqrt{(1 + \operatorname{tg}^2 \gamma)}. \quad (24)$$

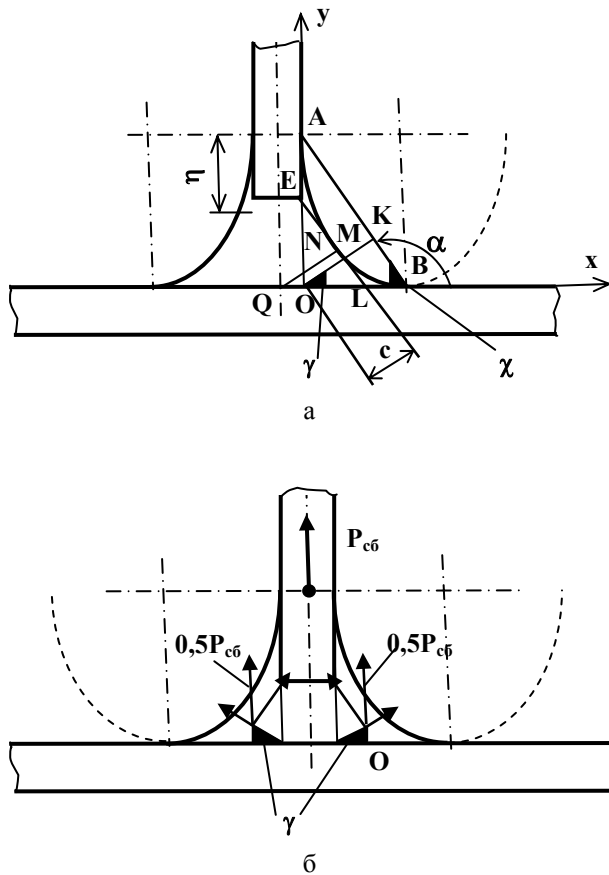


Рис. 7. Геометрические параметры клеевой галтели:
 а – геометрические параметры;
 б – перенос силы $P_{сб}$ на площадку галтели и разложение ее на составляющие

Для нахождения c_{\max} в общем случае необходимо найти производную от (24) по γ (или $\operatorname{tg} \gamma$) и, приравняв ее нулю, определить угол наклона ширины площадки, соответствующей максимальному эквивалентному напряжению (18) по компонентам (19).

Для случая, когда материал сотов и обшивки одинаков и условия нанесения клея на торцы сотов и склеивания соединения идентичны температуре и давлению

$$b_0 = b_c = b, \quad \zeta_{\sigma, \mu} = 1,$$

тогда

$$c = \frac{b_0}{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma} \left[(1 + \operatorname{tg} \gamma) - \sqrt{2 \operatorname{tg} \gamma} \right] \sqrt{(1 + \operatorname{tg}^2 \gamma)}. \quad (25)$$

На рис. 8 представлены значения σ_v с точностью до константы

$$A = \frac{P_{сб}}{2l_{кш} b},$$

посчитанной по формуле (18) с учетом выражений (19) и (24)*.

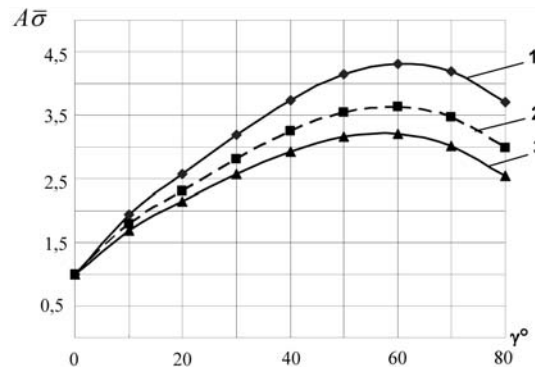


Рис. 8. Зависимость эквивалентных напряжений $A \bar{\sigma}_v$ от угла наклона площадки приложенной силы γ клеевой галтели для различных соотношений свойств материалов сотов и обшивки $\zeta_{\sigma, \mu}$:

1 – $\zeta_{\sigma, \mu} = 0,75$; 2 – $\zeta_{\sigma, \mu} = 1$; 3 – $\zeta_{\sigma, \mu} = 1,25$

Основным недостатком аналитического расчета является не только приближенный характер используемых в нем математических моделей, но и невозможность с их помощью оценить несущую способность клеевой галтели при различном относительном уровне проникновения торцов граней СЗ в клеевую галтель η/b_0 (рис. 6), как уже отмечалось выше в начале данной статьи.

В связи с этим ниже проведен анализ возможности уточнения несущей способности клеевых галтелей при различном относительном уровне проникновения в нее торцов граней СЗ с помощью конечноэлементных математических моделей. Эти модели позволяют выявить максимальные эквивалентные напряжения $\bar{\sigma}_v^{\max}$ по неосредненным их компонентам с помощью зависимости (7). Выявляемый с помощью МКЭ весьма сложный характер распределения деформаций и напряжений в зоне клеевой галтели (рис. 9) демонстрирует высокую степень приближенности определения

*) Как видно из рис. 8, $\bar{\sigma}_v$ соответствуют углу наклона площадки $\gamma = 60^\circ$, что, вообще говоря, расходится с прогнозом работы [7], в которой априори принято $\gamma = 45^\circ$, хотя в диапазоне углов $50^\circ \leq \gamma \leq 75^\circ$ имеет место пологий максимум относительно угла $\gamma = 60^\circ$. Относительное отклонение значения $A \bar{\sigma}_v$ при $\gamma = 60^\circ$ от этой величины при $\gamma = 50^\circ$ составляет 1,6...2,2 %, а от $\gamma = 70^\circ$ - 3,5...6 %. Это свидетельствует о том, что выбор площадки приложения нагрузки в диапазоне углов $45^\circ \leq \gamma \leq 70^\circ$ не приведет при $0,75 \leq \zeta_{\sigma, \mu} \leq 1,25$ к заметной погрешности в определении максимальных эквивалентных напряжений.

σ_v^{max} по их средним компонентам (19), действующим на нормальной площадке c_{max} .

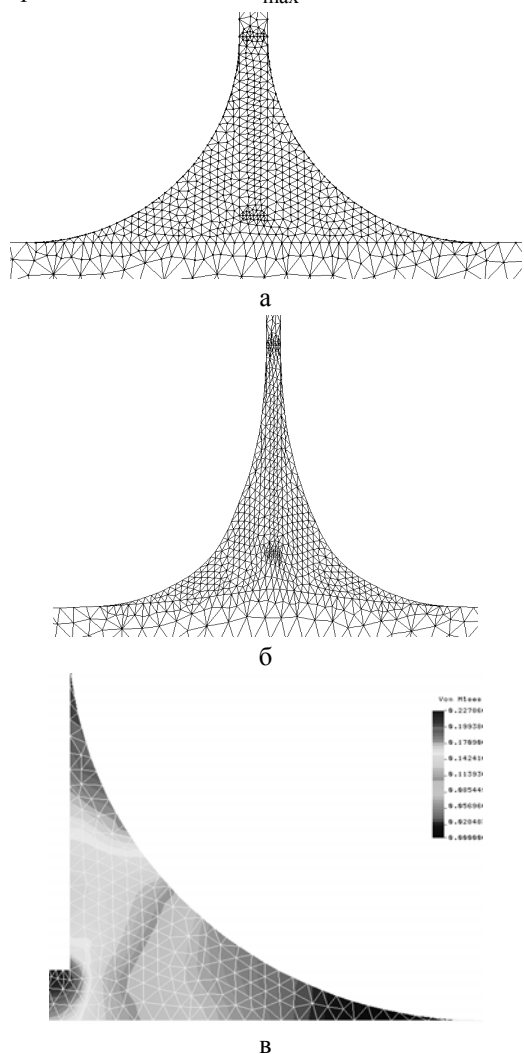


Рис. 9. Картина распределения деформаций и эквивалентных напряжений в клеевой галтели: а, б – распределение деформаций при различной относительной глубине погружения торцов граней СЗ в клеевую галтель; в – картина распределения эквивалентных напряжений

В то же время общеизвестна зависимость результатов расчета МКЭ от выбора размера конечных элементов, степени нерегулярности зоны определения напряжений в конкретной решаемой задаче [14]. В связи с этим в качестве примера в табл. 4 приведены результаты определения относительного максимального напряжения в клеевой галтели для двух клеев, имеющих модули упругости $E_1=7$ ГПа и $E_2=15,6$ ГПа, охватывающих практически весь диапазон встречающихся в практике клеевых композиций [1, 2].

Расчет проведен для случая $\bar{\sigma}_v^{max}$ для нормальных и касательных компонент напряжений $\bar{\sigma}_{yi}$ и

$\bar{\tau}_{xyi}$, полученных при $\sigma_{C3}=1$ МПа. При этом исследовался случай одинакового материала СЗ и обшивки $\zeta_{\sigma,\mu}=1$ и двустороннего наноса клея на торцы сотов $\bar{m}_\eta=1,2 \cdot 10^{-3}$ г/см². Исследована алюминиевая фольга АМг2-Н: $E_\phi=70$ ГПа; $\sigma_{в\phi}=50$ МПа; $\delta_\phi=0,03$ мм правильной шестигранной формы со стороной $a=5$ мм.

Исходный размер катета клеевой галтели, определенный по формулам (15) – (17) при $\bar{\eta}=1$, равен $b=0,234$ мм. Расчет проводился при трех размерах трехузловых конечных элементов $r_{a1}=12$ мкм, $r_{a2}=6$ мкм и $r_{a3}=3$ мкм с целью проследить характер и динамику изменения результатов расчета $\bar{\sigma}_v$ от этих размеров.

Таблица 4

Зависимость $\bar{\sigma}_v^{max} = f(\bar{\eta})$ для клеевой галтели от степени проникновения торцов граней СЗ в клей

b_0	0,205	0,210	0,219	0,229	0,234	E_η , ГПа
$\bar{\eta}$	0,131	0,285	0,589	0,869	1	
$\bar{\sigma}_v(r_{a1})$	<u>0,654</u> 1322	<u>0,476</u> 1278	<u>0,281</u> 1212	<u>0,224</u> 1170	<u>0,202</u> 1446	15,6
$\bar{\sigma}_v(r_{a2})$	<u>0,738</u> 5236	<u>0,519</u> 4864	<u>0,305</u> 4744	<u>0,228</u> 4630	<u>0,206</u> 5806	
$\bar{\sigma}_v(r_{a3})$	<u>0,765</u> 20472	<u>0,581</u> 19926	<u>0,335</u> 18820	<u>0,243</u> 18426	<u>0,240</u> 23088	
$\bar{\sigma}_{v\text{appr}}$	0,782	0,670	0,380	0,267	0,295	
$\bar{\sigma}_v(r_{a1})$	0,640	0,478	0,285	0,238	0,098	7
$\bar{\sigma}_v(r_{a2})$	0,745	0,507	0,328	0,255	0,137	
$\bar{\sigma}_v(r_{a3})$	0,783	0,604	0,368	0,284	0,210	
$\bar{\sigma}_{v\text{appr}}$	0,811	0,756	0,420	0,327	0,319	

В табл. 4 обозначено: в строках $\bar{\sigma}_v^{max} = f(\bar{\eta})$ для $E_\eta=15,6$ ГПа числители столбцов – значения $\bar{\sigma}_v(r_{ai})$; знаменатели столбцов – число конечных элементов при моделировании клеевой галтели в соответствующей математической модели; $\bar{\sigma}_{v\text{appr}}$ – значения $\bar{\sigma}_v$ при аппроксимации зависимости $\bar{\sigma}_v^{max} = f(\bar{\eta})$ квадратичной функцией.

На рис. 10 приведены соответствующие зависимости $\bar{\sigma}_v^{max} = f(\bar{\eta})$ для различных размеров конечных элементов при аппроксимации полиномом третьей степени.

На рис. 11 приведены графики аппроксимации зависимости $\bar{\sigma}_v = f(\bar{\eta})$ для различных клеев полиномом третьей степени для предельной величины конечных элементов в сравнении с результатами расчета по аналитической модели.

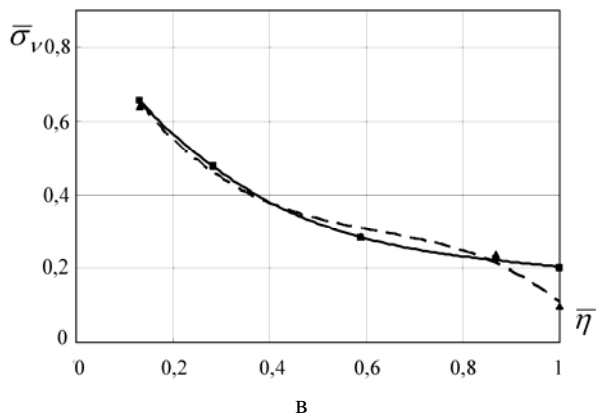
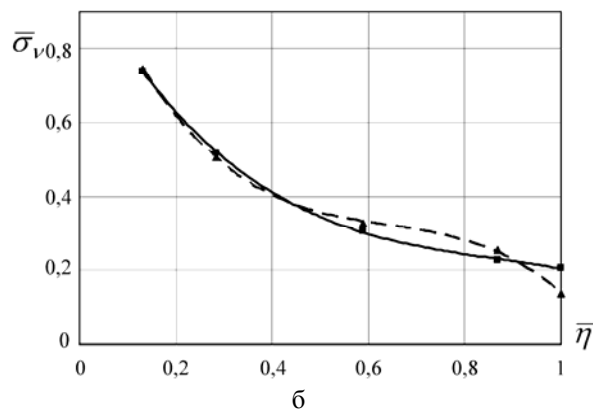
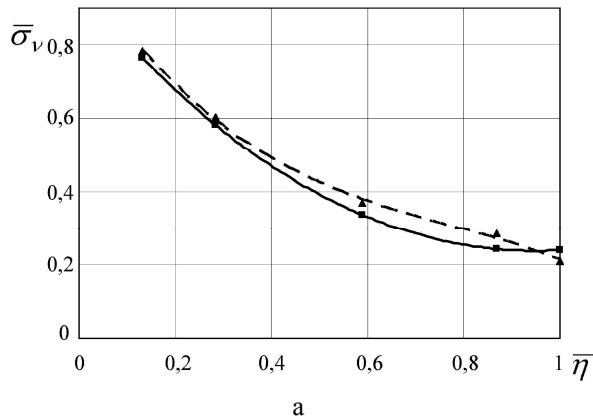


Рис. 10. Зависимость $\bar{\sigma}_v = f(\bar{\eta})$ для различных размеров конечных элементов:
 а – $r_a = 12$ мкм, б – $r_a = 6$ мкм, в – $r_a = 3$ мкм.
 — — $E_\eta = 15,6$ ГПа; - - - $E_\eta = 7$ ГПа

Рис. 12 демонстрирует пример зависимости

$$\bar{\sigma}_v = -0,0006r_a^2 - 0,004r_a + 0,782, \quad (26)$$

полученной обработкой данных столбцов $\bar{\sigma}_v$ табл. 4 для различных размеров конечных элементов, соответствующей $\bar{\eta} = 0,131$ и $b_0 = 0,205$, из которой следует, что при $r_a \rightarrow 0$ $\bar{\sigma}_v = 0,782$, что является «абсолютно точным» значением при данных размерах клеевой галтели.

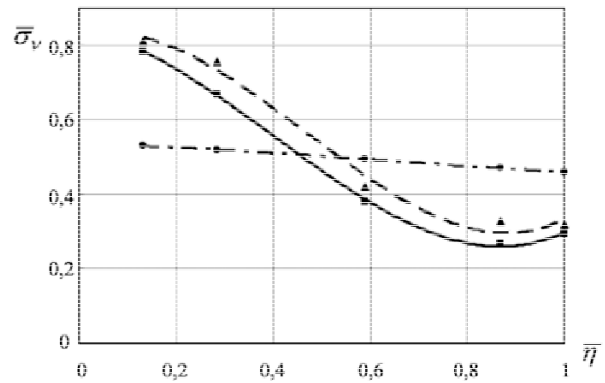


Рис. 11. Зависимость $\bar{\sigma}_v = f(\bar{\eta})$ для различных клеев

при $r_a \rightarrow 0$:

- — $E_\eta = 15,6$ ГПа; - - - $E_\eta = 7$ ГПа;
- · - - аналитическая зависимость

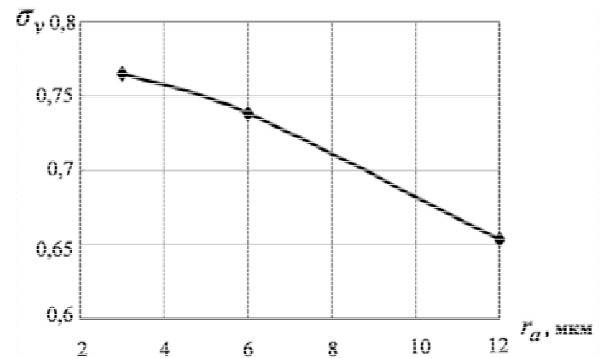


Рис. 12. Зависимость $\bar{\sigma}_v = f(\bar{\eta})$
 для клеевой галтели с параметрами:
 $E_\eta = 15,6$ ГПа; $\bar{\eta} = 0,131$; $b_0 = 0,205$ мм (пример)

Из этого графика можно сделать качественный вывод о том, что для задач рассматриваемого класса при заданной точности результата, например 5 %, необходимо выбрать размер конечного элемента исходя из относительной погрешности

$$\frac{0,782 - \bar{\sigma}_v(r_a)}{0,782} \cdot 100\% = 5\%,$$

т.е. $\bar{\sigma}_v(r_a) = 0,746$ и $r_a = 5$ мкм.

Для сравнения результатов расчета по МКЭ с аналитической математической моделью по средним компонентам напряжений в соответствии с зависимостями (1) – (5) для случая $\zeta_{\sigma,\mu} = 1$; $\delta_c = 5$ мм; $k = 1$; $\beta = 60^\circ$ были определены максимальные эквивалентные напряжения $\bar{\sigma}_{v\text{анал}}^{\max}$ на площадке под углом $\gamma = 60^\circ$ при напряжениях в фольге $\bar{\sigma}_{C3} = 1$ МПа. Ширина площадки, определенная по формуле (24), составляла $s_{60} = 0,435b_0$. Результаты вычислений приведены в табл. 5 и показаны на графике рис. 11.

Таблица 5

Сравнение результатов расчета максимальных эквивалентных напряжений в клеевой галтели МКЭ и по аналитической математической модели

$\bar{\eta}$		0,131	0,285	0,589	0,869	1
b_0 , мм		0,205	0,210	0,289	0,229	0,234
$\bar{\sigma}_{v \text{ МКЭ}}^{\text{max}}$, МПа	$E_{\eta}=7$ ГПа	0,811	0,756	0,420	0,327	0,319
	$E_{\eta}=15,6$ ГПа	0,782	0,670	0,380	0,267	0,295
$\bar{\sigma}_{v \text{ анал}}^{\text{max}}$, МПа		0,530	0,520	0,495	0,470	0,460

Выводы

Проведенные выше исследования позволяют сделать следующие предварительные выводы.

1. Сравнение единичных (при $\sigma_{C3}=1$ МПа) максимальных эквивалентных напряжений в клеевой галтели, полученных МКЭ в точке, где составляющие этих напряжений максимальны, и на основе аналитической математической модели для средних составляющих напряжений на наклонной площадке, позволяет сделать вывод об их качественной сопоставимости на всем интервале относительных глубин проникновения торцов граней СЗ в клеевую галтель. Различие в относительной степени расхождения сравнительных результатов составляет при малых значениях $\bar{\eta}$ 35...32 %, а при полной глубине проникновения $\bar{\eta}=1$ - 44...56 % (см. рис. 11) для различных значений модулей упругости клея, к которым результаты расчета МКЭ имеют сильную чувствительность в отличие от полученных аналитическим методом (см. табл. 2).

2. Результаты, полученные МКЭ, свидетельствуют о существенной зависимости уровня несущей способности клеевой галтели от глубины проникновения торцов СЗ в клей. Так относительное различие в несущей способности в начале ($\bar{\eta}=0,131$) и в конце ($\bar{\eta}=1$) этого интервала составляет 60...62 % при разных модулях упругости клея.

3. Исходя из результата п. 2, по-видимому, следует рекомендовать производить склеивание панели с адресным нанесением клея на торцы СЗ при технологическом режиме, по температуре и давлению обеспечивающем глубину проникновения торцов СЗ в клей $\bar{\eta} \geq 0,5$.

4. Для более обоснованных рекомендаций, касающихся несущей способности клеевых галтелей при адресном нанесении клея на торцы сотов, представляется необходимым проведение дальнейших широких численных экспериментов, подкрепленных испытаниями представительных серий реальных образцов соединений исследуемого вида.

Литература

1. Берсудский, В.Е. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций [Текст] / В.Е. Берсудский, В.Н. Крысин, С.И. Лесных. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
2. Ендогур, А.И. Сотовые конструкции. [Текст] / А.И. Ендогур, М.В. Вайнберг, К.М. Иерусалимский. – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.
3. Двейрин, А.З. Сотовые конструкции в самолетах АНТК им. Антонова: опыт применения и перспективы [Текст] / А.З. Двейрин, В.С. Петропольский, А.М. Баранников // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2009. – С. 98 – 104.
4. Сливинский, В.И. Объективные предпосылки эффективного применения сотовых конструкций [Текст] / В.И. Сливинский, Г.В. Ткаченко, А.Н. Колоскова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 25(2). – X., 2001. – С. 109 – 115.
5. Концепция теоретического обеспечения технологии изготовления суперлегких панелей солнечных батарей космического назначения [Текст] / В.Е. Гайдачук, А.И. Грошевой, В.В. Кириченко, В.И. Сливинский // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского за 1997 г. – X., 1998. – С. 322 – 327
6. Огурек, О.Н. О выборе параметров клея для сотовых конструкций [Текст] / О.Н. Огурек, Л.М. Старикив, В.Г. Бондарь // Вопросы оптимизации тонкостенных силовых конструкций: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та. – Вып. 3. – X., 1977. – С. 73 – 79.
7. Создание рационального клеевого соединения сотовых заполнителей с обшивками в конструкциях авиационно-космического назначения [Текст] / В.Е. Гайдачук, Г.В. Ткаченко, О.А. Карпилова, В.И. Сливинский // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2009. – С. 148 – 155.
8. Анализ альтернативных методов определения несущей способности сотовых конструкций при нанесении клея на торцы граней сотового заполнителя [Текст] / В.Е. Гайдачук, О.А. Карпилова, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов IV Межд. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2011. – С. 60 – 75.
9. Технология производства панелей солнечных батарей космических аппаратов из полимерных композиционных материалов с сотовым заполнителем [Текст] / В.Е. Гайдачук, С.И. Весельский, В.В. Кириченко, В.И. Сливинский, Х.А. Эрнандес Тамayo // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2007. – С. 81 – 86.

10. Несущая способность клевого соединения сотовых заполнителей из алюминиевой фольги с обшивками в трехслойных конструкциях летательных аппаратов [Текст] / В.Е. Гайдачук, О.А. Карпикова, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев, С.М. Мельников // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2011. – С. 83 – 90.

11. Несущая способность трехслойных конструкций с сотовым заполнителем из полимерной бумаги при трансверсальном отрыве обшивок [Текст] / В.Е. Гайдачук, О.А. Карпикова, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической тех-

ники: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2011. – С. 76 – 82.

12. Гайдачук, В.Е. Выбор оптимального давления при формовании конструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, М.А. Сидоренкова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 16(3). – X., 1999. – С. 25 – 37.

13. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов [Текст] / Н.М. Беляев. – М.: Наука, 1976. – 608 с.

14. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство [Текст] / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

Поступила в редакцию 14.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. авиационного материаловедения Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

ЗАЛЕЖНІСТЬ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СТІЛЬНИКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРІ ТРАНСВЕРСАЛЬНОМУ ВІДРИВІ ВІД ТЕХНОЛОГІЇ СКЛЕЮВАННЯ ОБШИВОК ІЗ ЗАПОВНЮВАЧЕМ

В.Є. Гайдачук, О.О. Карпикова, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьєв

Проведено аналіз несучої здатності тришарових конструкцій літальних апаратів, що піддані впливу внутрішнього тиску, зі стільниковим заповнювачем з алюмінієвої фольги та полімерного папери, приєднаним до несучих обшивок за допомогою клейової плівки або адресного нанесення клею на торці стільників у широкому діапазоні його фізико-механічних характеристик. Отримані результати свідчать про істотну залежність рівня несучої здатності клейовий галтелі від глибини проникнення торців стільників у клей. Показана можливість економії енергетичних ресурсів, що витрачаються в процесі збирання-склеювання конструкцій досліджуваного виду.

Ключові слова: тришарові конструкції, внутрішній тиск, трансверсальний відрив обшивок, стільниковий заповнювач, клейова плівка, адресне нанесення клею, клейова галтель, несуча здатність, збірка-склеювання.

DEPENDENCE OF CARRYING CAPACITY OF CELLULAR STRUCTURES AT TRANSVERSALLY BREAK FROM GLUING TECHNOLOGY CLADDING WITH FILLER

V.E. Gajdachuk, O.A. Karpikova, V.V. Kyrychenko, A.V. Kondratyev

The analysis of the bearing capacity of sandwich structures of aircraft subjected to impact-charged internal pressure, a honeycomb of aluminum foil and the polymer of paper attached to the bearing casing by means of adhesive film deposition, or the address of glue on the ends of the honeycomb in a wide range of its physical and mechanical characteristics. The results indicate a strong dependence of the carrier level ability glue fillets on the depth of penetration of the ends of the comb in the glue. The possibility of saving energy resources expended in the process of assembling and bonding structures of the investigated species.

Key words: three-layer structure, internal pressure, transverse separation of skins, honeycomb, adhesive tape, the address adhesive, adhesive fillet, bearing capacity, the build-gluing.

Гайдачук Віталій Євгенєвич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектування ракетно-космічних апаратів, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: k403@d4.khai.edu.

Карпикова Оксана Александровна – аспірант каф. проектування ракетно-космічних апаратів, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: honeycom@ua.fm.

Кириченко Валерий Васильевич – канд. техн. наук, доцент, проф. каф. проектування ракетно-космічних апаратів, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: v_kyrychenko@mail.ru.

Кондратьев Андрей Валерьевич – канд. техн. наук, доцент каф. проектування ракетно-космічних апаратів, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kondratyev_a_v@mail.ru.