

Введение Для проверки гипотезы о том, что при замерзании вода в ячейках сотовых элементов расширяется только в продольном направлении, был проведен эксперимент с реальной сотовой конструкцией. Исследовался клиновидный сотовый агрегат, показанный на рис. 1, с габаритными размерами хорда $b=370$ мм, размах $l=300$ мм, максимальная высота агрегата $h=70$ мм. Сотовый наполнитель данного агрегата изготовлен из фольги на основе алюминиевого сплава АМг2н. Поперечное сечение наполнителя имеет форму правильного шестигранника со стороной ячейки $a_c=5$ мм и толщиной стенки ячейки $b_c=0,05$ мм. Толщина несущих слоев сотового агрегата $b_{н.с.}=0,5$ мм. Рис. 1 – Агрегат сотовой конструкции Экспериментальная часть Через отверстия в боковых ребрах жесткости в агрегат была залита вода. В концевой (вершина клина) части агрегата вода полностью заполнила ячейки сот, в передней и центральной частях уровень воды был различен, и вода могла свободно расширяться вдоль каналов сотового наполнителя. После заполнения водой сотовый агрегат был охлажден до температуры t равной минус $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. После заморозки и осмотра агрегата было установлено, что в тех местах, где ячейки сот были полностью заполнены водой (концевая часть), агрегат существенно деформировался (рис. 1). В зонах, где уровень воды в сотах был меньше 90 % высоты сотового наполнителя (передняя и центральная части агрегата), деформации обшивки не обнаружены. Затем с агрегата была удалена обшивка и произведен осмотр состояния сотового наполнителя, который показал, что ячейки сот сохранили свой первоначальный недеформированный вид. Наиболее опасным для прочности сотовой конструкции является давление, которое оказывает лед на несущие слои панели. Рассмотрим участок панели с сотовым наполнителем, находящимся под действием внутреннего давления (давления, которое создает образующийся лед). Схематично участок сотовой панели, нагруженный давлением льда можно представить в виде прямоугольной трехслойной пластины со сторонами a и b и защемленной по всем четырем сторонам. Считается, что сотовые ячейки заполнены льдом полностью, поэтому внутреннее давление будет действовать только на отрыв внешних слоев панели (разрыв сотового наполнителя), а боковое давление на стенки сот будет скомпенсировано. Так как давление льда на верхний и нижний слои одинаково, то при расчете на прочность рассмотрим только нижний несущий слой и участок сотового наполнителя высотой равной половине высоты всего сотового пакета панели. Таким образом, нижний несущий слой и участок сотового наполнителя представим в виде двухслойной приведенной пластинки, у которой сотовый наполнитель будет размазан по поверхности несущего слоя. Данная схема нагружения представлена на рис. 2. В расчете на прочность сотовой панели используем имеющиеся в литературе [1] решения по определению величины прогибов для защемленных прямоугольных пластинок, нагруженных внешним давлением. Рис. 2 – Схема нагружения сотового агрегата Максимальный прогиб

$\zeta_{\max}$, который возникает в центре прямоугольной пластины, будет определяться по следующей формуле [1]: , (1) где α — коэффициент, зависящий от соотношения сторон пластины; p — величина равномерно распределенного по поверхности пластины давления; b — длина пластины; $E_{\text{пр}}$ — приведенный модуль упругости двухслойной пластины; $\delta_{\text{пр}}$ — приведенная толщина двухслойной пластины. Значения коэффициента α для различных соотношений сторон пластины приведены в таблице.

Соотношение сторон a/b	Коэффициент α
1	0,0138
1,2	0,0188
1,4	0,0226
1,6	0,0251
1,8	0,0267
2	0,0277
∞	0,0284

Приведенный модуль упругости $E_{\text{пр}}$ можно приблизительно определить по следующей формуле: , где — приведенный коэффициент Пуассона двухслойной пластины; E_k — модуль упругости k -го слоя; μ_k — коэффициент Пуассона k -го слоя; $\delta_1 = \delta_{\text{н.с.}}$ — толщина несущего слоя сотовой панели; $\delta_1 = \delta_{\text{з.пр.}}$ — приведенная толщина сотового заполнителя, размазанного по поверхности первого слоя (несущего слоя панели). Эта толщина определяется: , где $S_{\text{п.я.}}$ — площадь поперечного сечения стенок сотовой ячейки; n — число сотовых ячеек, находящихся в пределах пластинки со сторонами a и b ; h_z — высота сотового заполнителя; $S_{\text{рас}} = ab$ — площадь расчетного участка со льдом (площадь приведенной двухслойной пластины). Соответственно приведенная толщина двухслойной пластины будет равна: . На самолетах несущий слой сотовых панелей изготовлен из алюминиевого сплава Д-19Т, сотовый заполнитель из алюминиевого сплава АМг2н. Величины модуля упругости этих сплавов E и коэффициента Пуассона μ практически одинаковы, и приблизительно равны $7 \cdot 10^{11}$ Па и 0,33 соответственно. Поэтому для упрощения расчетов приведенный модуль упругости двухслойной панели $E_{\text{пр}}$ можно считать равным модулю упругости несущего слоя $E_1 = E$. Разрушение панели с сотовым заполнителем наступит тогда, когда максимальные относительные продольные деформации в заполнителе достигнут величины разрушающих деформаций: $\epsilon_{\max}$ больше или равно $\epsilon_{\text{раз}}$. За разрушающие деформации можно принять деформации достижения условного предела текучести $\epsilon_{\text{раз}} = \epsilon_{0,2}$, либо деформации соответствующие разрыву сотового заполнителя $\epsilon_{\text{раз}} = \epsilon_{10}$ (для АМг2н $\epsilon_{10} = 4\%$, где ϵ_{10} — относительная деформация после разрыва образца на длине $l_0 = 10d_0$, где d_0 — начальный диаметр образца). Максимальные продольные деформации в заполнителе $\epsilon_{\max}$ через максимальный прогиб пластины $\zeta_{\max}$ можно выразить следующим образом: . (2) Тогда согласно (1) и (2) максимальные продольные деформации в заполнителе $\epsilon_{\max}$ под действием внутреннего давления p будут равны: . (3) Информацию о распределении воды в пределах сотового агрегата можно получить с помощью средств неразрушающего контроля. На основании формул (1) и (3) можно определить величину продольных деформаций в сотовом заполнителе и уровень выпучивания несущего слоя панели при фазовом переходе воды (которая находится в ячейках сот) в лед. Из опыта эксплуатации сотовых агрегатов, находящихся в составе закрылков или элеронов воздушных

судов известно, что вода скапливается в зонах, которые располагаются в районе концевых сечений агрегатов у их боковых стенок. Причем в пределах этих участков уровень воды по ячейкам сот распределяется неравномерно. На рис. 3 черным цветом показаны области с ячейками, полностью заполненными водой, темным цветом — вода заполняет более 90 % ячейки, светлым цветом — вода заполняет менее 90 % ячейки. Такой критерий распределения воды по ячейкам выбирается из условия фазового превращения воды в лед, в процессе которого ее объем увеличивается на 10 %. Если уровень воды в ячейке больше 90 %, то при образовании льда вода будет давить на несущие слои панели, в противном случае вода будет свободно расширяться вдоль канала ячейки и не окажет существенного давления на несущие слои панели. Для того чтобы определить размеры расчетной области $S_{рас} = ab$, необходимо все зоны с опасным уровнем воды (вода заполняет ячейки более чем на 90 %) очертить прямоугольными участками (рис. 3), если участки пересекаются друг с другом, то они суммируются, если участки не пересекаются, то они рассчитываются отдельно друг от друга (рис. 4). Рис. 3 – Определение размеров расчетной области агрегата $S_{рас}$ с несколькими опасными участками Рис. 4 – Определение размеров расчетной области агрегата $S_{рас}$ с отдельными опасными участками

Для варианта, изображенного на рис. 3, величина давления p , которое лед будет оказывать на расчетный участок $S_{рас} = ab$, определится по формуле: $p = p_{л} \cdot S_{оп} / S_{рас}$, где $p_{л}$ — величина давления льда на дно герметичной и полностью заполненной водой емкости; $S_{оп}$ — площадь зоны с опасным уровнем воды в ячейках. Для варианта, изображенного на рис. 4, $p = p_{л}$. Результаты исследований

Таким образом, на основании проведенного эксперимента с сотовым агрегатом можно сделать следующие выводы: - опасным для прочности сотовых панелей при образовании льда в ячейках сот будет уровень воды, превышающий 90 % высоты сотового заполнителя; - если уровень воды в ячейках сот меньше 90 % высоты сотового заполнителя, то в процессе фазового перехода воды в лед, вода будет расширяться в продольном направлении вдоль свободного канала сотового заполнителя, не оказывая существенного давления на стенки ячеек сот и несущие слои панели; - если ячейки сотового заполнителя полностью заполнены водой, то при образовании льда вода будет оказывать давление на несущие слои панели равное $p_{л} = 9$ МПа, при этом давление на стенки сотового заполнителя будет скомпенсировано давлением в соседних ячейках.

Приведенные особенности расчета прочностных характеристик сотовых конструкций авиационной техники, подверженных воздействию влаги при отрицательных температурах, позволяют оценивать изменение несущей способности сотовых изделий в процессе эксплуатации и ремонта авиационной техники