

УДК 678.5.004(100): 678.046

## **Отработка приемов минимизации смещения сотового заполнителя при формовании конструкций из полимерных композиционных материалов**

**Насонов Ф.А.**

*Опытно-конструкторское бюро «Сухого»,  
ул. Поликарпова, 23А, Москва, 125284, Россия  
e-mail: nasonovf2006@mail.ru*

### **Аннотация**

При формовании деталей сотовой конструкции, особенно включающих в себя сотовые панели относительно большой высоты и имеющие угол скоса сот по кромкам более  $45^\circ$ , часто возникают явления нежелательного смещения сотовых панелей относительно их первоначального положения. Целью настоящей работы является решение задачи минимизации или полного устранения смещения сотовых панелей при формовании сотовых конструкций. Актуальность работы по поиску путей решения проблем, стоящих при проектировании и изготовлении деталей с сотовым заполнителем большой высоты и углом скоса более  $45^\circ$  обусловлена конструктивными особенностями ряда агрегатов существующих и перспективных изделий авиационной техники. Исходя из выявленных факторов, влияющих на смещение заполнителя, и различных вариантов и путей решения этой задачи, была проведена экспериментальная работа по изготовлению образцов. В качестве возможного эффективного решения проблемы предложено использовать: для скосов, выходящих на технологический припуск - удерживающие и фрикционные материалы: полосы из абразивных сеток и перфорированной стальной фольги;

применение приема локального увеличения жесткости сотового заполнителя посредством вставки сот с изменением направления растяжки с учетом определенных геометрических соотношений прямых и наклонных участков заполнителей.

**Ключевые слова:** трехслойная сотовая конструкция, сотовый заполнитель, производственная технологичность сотовых конструкций, процесс формования, полимерный композиционный материал.

При формовании деталей сотовой конструкции, особенно включающих в себя сотовые панели относительно большой высоты (более 30 мм) и имеющие угол скоса сот по кромкам более  $45^\circ$ , имеет место возникновение явлений смещения сотовых панелей относительно их первоначального положения [1]. Эти смещения не только снижают общее качество изделий, но и приводят к отклонениям от требований конструкторской документации (КД), что влечет за собой бракование изделий [1, 2]. При этом брак чаще всего обнаруживается после разборки пакета после формования и исправлению не подлежит.

Поэтому в рамках решения данной задачи следует провести:

- анализ причин (факторов), вызывающих смещение сотовых заполнителей;
- рассмотрение существующих решений проблемы смещения сотовых заполнителей;
- поиск и отработка эффективных решений проблемы смещения сотовых заполнителей при формовании;

- выработка оптимальных конструкторско-технологических решений по повышению производственной технологичности деталей сотовой конструкции, включающих в себя сотовые панели относительно большой высоты и имеющие угол скоса сот по кромкам более 45 °.

Настоящая работа направлена на решение задачи минимизации или полного устранения смещения сотовых панелей при формировании сотовых конструкций.

Актуальность работы по поиску путей решения проблем, стоящих при проектировании и изготовлении деталей с сотовым наполнителем большой высоты и углом скоса более 45° [3] обусловлена конструктивными особенностями ряда агрегатов существующих и перспективных изделий авиационной техники.

## **1 Анализ факторов, обуславливающих смещение сот**

Основными причинами смещения сот в собранном пакете в процессе формирования сотовых конструкций являются:

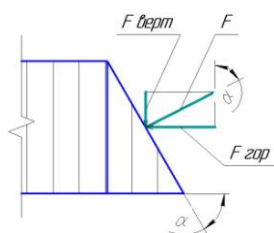
- недостаточная жесткость сотового блока при противодействии горизонтальной составляющей усилия, создаваемого приложенным к пакету-заготовке давлением формирования;

- недостаточная сила сцепления сот относительно контактирующего с ними слоя обшивки.

Рассмотрим эти факторы по отдельности.

## 1.1 Причина 1. Недостаточная жесткость сотоблока

Смещение (смятие) сот происходит в горизонтальной плоскости из-за того, что величина горизонтальной составляющей усилия формования становится по величине больше противодействующей силы со стороны сотового заполнителя (рисунок 1).



$F$  – усилие формования;  $F_{\text{верт}}$  – вертикальная составляющая вектора;  $F_{\text{гор}}$  – горизонтальная составляющая вектора;  $\alpha$  – угол скоса заполнителя.

Рисунок 1 – Схема действующих сил

Соты деформируются (складываются) в направлении растяжки (поперек направления клеевых полос), так как их модуль упругости (жесткость) и прочность на сжатие в этом направлении оказываются недостаточными.

## 1.2 Причина 2. Недостаточная сила сцепления

Силу сцепления между торцевой поверхностью сотового заполнителя и поверхностью полуфабриката пластика (препрега) по своей природе можно разложить на несколько составляющих: сила трения, силы гидродинамического сопротивления движению (проскальзыванию) торцов сот в слое нанесенного на полуфабрикат связующего, силы механических зацеплений поверхностей (ворсистость, заусенцы, зазубрины).

При совместности действия этих сил имеет смысл рассматривать их, как результирующее действие возникающей в итоге силы сцепления, которую упрощенно можно описать физическим законом, схожим с зависимостью силы трения покоя и трения скольжения от нормально действующей силы и коэффициентом пропорциональности между ними – коэффициентом трения.

$$F_{сц} = K_{усл} \times F_{приж} \quad (1)$$

где  $F_{сц}$  – условная сила сцепления, действующая по направлению против возникающих смещающих сил; при противодействии горизонтальной составляющей усилия формования – действует против нее в горизонтальном направлении;

$K_{усл}$  – условный коэффициент сцепления, по физическому смыслу близкий к коэффициенту трения;

$F_{приж}$  – нормальная сила, взятая без учета веса самих сот – прижимающая сила.

Схема действующих сил представлена на рисунке 1.

## **2 Рассмотрение существующих решений проблемы смещения сотовых заполнителей**

На практике встречаются разные подходы решения данной проблемы.

Пути решения проблемы по своим физическим основам можно условно разделить на группы:

**1 Уменьшение величины смещающих сил.** Снижение величин смещающих сил, направленных горизонтально, позволяет предупредить смещение заполнителя.

Для этого могут применяться следующие методы:

1.1 В разных источниках предлагается уменьшать угол скоса до  $20^\circ$  и менее [3]. Очевидно (п. 1.1 и рисунок 1), чем меньше угол скоса, тем меньше горизонтальная составляющая действующего усилия формования – меньше сдвигающие усилия. Данный метод не всегда возможно реализовать, т.к. это часто обусловлено ограничениями, накладываемыми особенностями конструкции детали (строительные высоты и др.);

1.2 В некоторых случаях могут изменять параметры режимов формования, в частности, давления формования. Однако при изменении давления формования в сторону уменьшения может измениться уровень механических свойств и качество изделий (применимо для неответственных изделий с низкими требованиями по прочности);

**2 Повышение жесткости заполнителя.** Повышенная жесткость заполнителя позволяет ему сопротивляться возникающим смещающим (сминающим) силам. Применяются:

2.1 Заполнители увеличенной жесткости. Увеличиваются прочность и жесткость, но при этом увеличивается и общий вес применяемого заполнителя, его стоимость;

2.2 Заливка ячеек заполнителя полимерными составами для повышения его жесткости. Также увеличивается вес и стоимость материалов;

2.3 Расположение промежуточных слоев стеклоткани в качестве перегородок между слоями заполнителей для увеличения общей жесткости. Потребуется

значительной переработки конструкции, резко увеличивается количество технологических операций, трудоемкость и время цикла;

**3 Повышение силы сцепления** сот с обшивкой может позволить сотовым заполнителям также сопротивляться сдвигающим усилиям. Возможные пути:

3.1 Применяют формование и склейку одной из обшивок и сот перед окончательным совместным формованием. Резко увеличиваются количество технологических операций, трудоемкость изготовления, время цикла;

3.2 Использование зажимов и иных приспособлений для удержания слоев полуфабрикатов. Применение технологических материалов (абразивных материалов, игольчатых сеток и др.), вспомогательных приспособлений (зажимов и т.д.);

**3 Поиск и отработка эффективных способов минимизации смещения сотовых заполнителей.**

Особенно остро вопрос поиска и отработки эффективных способов минимизации смещения сотовых заполнителей при формовании стоит для изделий типа створок грузового отсека с углом скоса сотового заполнителя в конструкции  $60^\circ$ .

Исходя из обозначенных в п. 1 основных факторов, влияющих на смещение заполнителя, и различных вариантов и путей решения этой задачи, приведенных в п. 2, была проведена экспериментальная работа по изготовлению образцов.

Для предотвращения смещения сот необходимо создавать условия для возникновения достаточных сил сцепления между контактирующими элементами.

Это возможно либо повышая прижимающую силу, либо повышая условный коэффициент.

Повышение прижимающей сотовой заполнитель к обшивке силы возможно путем увеличения давления формования изделия. Но при этом также увеличится и горизонтальная составляющая, которая еще в большей степени будет стремиться сдвигать заполнители, именно поэтому давление формования в типовых технологических процессах изготовления сотовых конструкций ограничивается величиной  $2 \text{ кгс/см}^2$  для изделий сотовых конструкций.

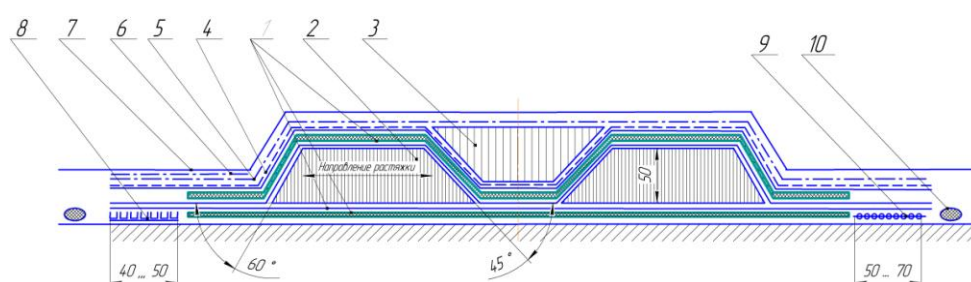
Второй путь – более реализуемый – это повышение значения условного коэффициента. Его значение будет зависеть от свойств поверхностей соприкасающихся материалов. Между собой контактируют торцы сотового заполнителя и препрег стеклопластика. Данные материалы выбраны конструктором исходя из требований прежде всего упруго-прочностных свойств, поэтому их замена невозможна. Для решения этой проблемы опробовался технологический прием удерживания препрега стеклопластика относительно поверхности оснастки с помощью вспомогательных материалов.

В качестве таких удерживающих материалов предлагается использовать: абразивную сетку или перфорированную фольгу, предварительно изготовленную из стальной фольги методом ударной перфорации. Полосы из этих материалов предлагается прокладывать между слоями, контактирующими с сотовым заполнителем, находящимися в зоне припуска. Припуск с этой целью может быть незначительно увеличен. При этом абразивная сетка будет выполнять функцию



материала с высоким коэффициентом трения. Перфорированная фольга в местах перфорации имеет «игольчатую» поверхность, которая своими «зацепами» будет дополнительно сопротивляться смещению слоев материалов.

Принципиальная схема технологического пакета формирования опытного образца сотовой конструкции с применением таких удерживающих материалов представлена на рисунке 2.



1 – обшивки, 2 – сотовый наполнитель, 3 – технологический вкладыш, 4 – разделительная пленка, 5 – дренажные слои, 6 – дополнительные дренажные слои, 7 – вакуумный чехол, 8 – перфорированная фольга на клее ВК-9, 9 – абразивная сетка, 10 – герметизирующий жгут

Рисунок 2 - Принципиальная схема технологического пакета

На эскизе вдоль левой кромки пакета-заготовки обшивок за зоной припуска образца установлена на клей ВК–9 полоса перфорированной фольги шириной 40 ... 50 мм. Вдоль правой кромки пакета-заготовки обшивки за зоной припуска образца уложена абразивная сетка шириной 50 ... 70 мм. Как видно из эскиза, смещению сотоблока препятствуют два слоя препрега стеклопластика, контактирующих с сотовым наполнителем не только по нижней, но также и по верхней поверхности, которые зафиксированы на удерживающих материалах. В соответствии с эскизом в центральной части образца установлен технологический вкладыш из сотоблока,

призванный предотвратить смещение сотозаполнителя по внутренним подсечкам и обеспечить проформовку элементов. При укладке дренажных слоев в зоне установки под припуск препрега стеклопластика перфорированной фольги уложены дополнительные слои дренажа для предотвращения повреждения вакуумного чехла удерживающими материалами.

В процессе изготовления данного образца было выявлено, что вспомогательные удерживающие материалы, установленные за припуском, достаточно эффективно выполняют свою функцию. В то же время использование незафиксированного технологического вкладыша в центральной части оказалось неэффективным вследствие его собственного деформирования.

Таким образом, применение данного технологического приема может дать эффект только для предотвращения смещения скосов сотового заполнителя, расположенных со стороны обреза детали.

Рассмотрим условие, при котором сотовый заполнитель начинает смещаться. Сотовый заполнитель начинает смещаться при превышении горизонтально сдвигающей силы прижимающей силы:

$$F_{гор} > F_{верт} \times K_{усл}$$

– условие смещения сотового заполнителя (см. рисунок 1),

где  $F_{гор}$  – горизонтальная составляющая вектора усилия формования,  $F_{верт}$  – вертикальная составляющая вектора усилия формования,  $K_{усл}$  – условный коэффициент сцепления поверхностей (аналогично формуле (1)).

Определим условный коэффициент сцепления из условий, при которых заведомо смещения заполнителей не происходит. Угол скоса  $\alpha$  таких панелей составляет  $30^\circ$ . Тогда

$$F_{гор} = F_{верт} \cdot K_{усл} \text{ (из 1, рисунок 1);}$$

$$K_{усл} = \frac{F_{гор}}{F_{верт}} = \operatorname{tg} \alpha \text{ (2)}$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \alpha = K_{усл} \approx 0,58 \text{ (3).}$$

Необходимо при этом отметить, что найденное значение условного коэффициента сцепления не является предельным значением.

Подставив значение условного коэффициента (3) в неравенство сил, действующих на соты в конструкциях панелей с углом скоса  $60^\circ$  получим:

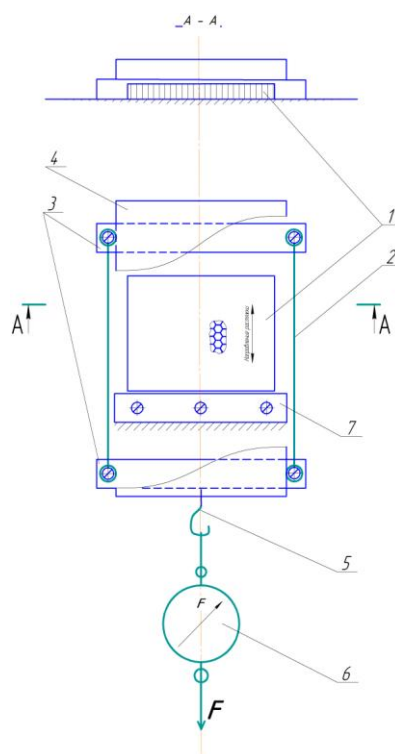
$$F_{гор} \text{ — } F_{верт} \cdot K_{усл};$$

$$p \cdot S \cdot \sin \alpha \text{ — } p \cdot S \cdot \cos \alpha \cdot K_{усл};$$

$$0,87 p \cdot S > 0,29 p \cdot S \text{ (4);}$$

Находим (4), что действительно происходит сдвиг сот, так как горизонтальная сдвигающая сила оказывается в таком случае больше противодействующей силе сцепления. Следовательно применение удерживающих вспомогательных материалов (стремление повысить  $K_{усл}$ ) вполне оправдано, но возможно, как уже говорилось, только в зонах выхода скосов заполнителей на кромку детали.

В дополнение к данному приему предлагается воспользоваться приемом повышения жесткости сотового заполнителя посредством его местной переориентации (разворота направления растяжки части заполнителя).



1 – сотоблок; 2 – тяга сжимных планок; 3 – сжимные планки; 4 – крышка; 5 – крюк сжимной планки; 6 – динамометр; 7 – упорная планка

Рисунок 3 – Принципиальная схема приспособления

Для оценки величин прочности при смятии сотовых заполнителей в направлении растяжки сот и поперек проводились измерения при помощи приспособления, представленного на рисунке 3.

Из серии измерений было определено усилие необратимой деформации в направлении растяжки сот  $F_{\text{необр. деф.1}} \approx 8 \text{ Н}$ ; в направлении, поперечном растяжке сот  $F_{\text{необр. деф.2}} \approx 24 \text{ Н}$ . Определение указанных параметров производилось на образцах поперечным сечением 8 x 100 мм растянутых сотовых заполнителей из фольги АМг2-Н (ОСТ 1 00728-75) толщиной 0,03 мм с размером ячейки 2,5 мм.

Тогда напряжение, при котором происходит необратимая деформация:

$$\sigma = \frac{F_{\text{необр.оэф}}}{S_{\text{сеч}}} \quad (5),$$

$$\sigma_1 \approx \frac{8}{0,1 \times 8 \times 10^{-3}} = 10^4 \text{ Па} = 0,01 \text{ МПа} - \text{вдоль направления растяжки сот};$$

$$\sigma_2 \approx \frac{24}{0,1 \times 8 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^4 \text{ Па} = 0,03 \text{ МПа} - \text{поперек направления растяжки сот}.$$

Значение  $\sigma_1$  напряжения смятия сот вдоль направления растяжки значительно меньше напряжения, создаваемого горизонтальной составляющей усилия формования. При давлении формования 0,2 МПа, создаваемое напряжение:

$$\sigma = \frac{F_{\text{сop}}}{S} = \frac{p \times S \times \sin \alpha}{S} = 0,2 \sin \alpha \quad (6).$$

При угле скоса  $30^\circ$  оно составляет порядка

$$\sigma_{30^\circ} = 0,2 \sin 30^\circ \approx 0,1 \text{ МПа}.$$

При этом известно, что при таком скосе смещения не происходит. Значит «вклад фактора смятия» в смещение сотового заполнителя можно приблизительно оценить значением не более

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{30^\circ}} \approx 10 \%$$

В то же время в конструкциях, в которых угол скоса составляет  $60^\circ$ , создаваемое напряжение будет составлять уже

$$\sigma_{60^\circ} = 0,2 \sin 60^\circ \approx 0,173 \text{ МПа}.$$

Значит, принимая относительное значение «вклада фактора смятия» в общее смещение сотового заполнителя около 10 %, минимально допустимое значение напряжения смятия сот должно быть

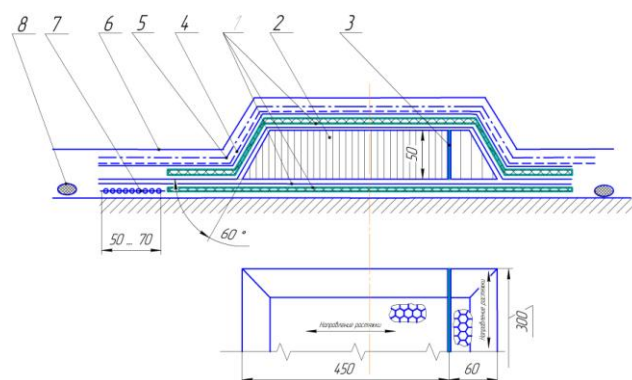
$$[\sigma] \approx \sigma_{60^\circ} \cdot 10 \% = 0,173 \cdot 0,1 = 0,0173 \approx 0,02 \text{ МПа}.$$

То есть, при поперечной прочности сотового заполнителя, большей рассчитанного значения, не должно наблюдаться его смещения под воздействием горизонтальной составляющей усилия формования. Измеренное значение напряжения поперек направления растяжки сот  $\sigma_2$  удовлетворяет этому условию:

$$\sigma_2 > [\sigma] \quad (7).$$

Таким образом, при изменении направления растяжки сотового заполнителя также возможно минимизировать его смещение. Увеличить жесткость сотового заполнителя можно локально, изменив направление растяжки в районе скоса.

Эскиз технологического пакета с таким вариантом укладки сотового заполнителя представлен на рисунке 4.



1 – обшивка, 2 – сотовый заполнитель, 3 – клеевая пленка ВКВ-3, 4 – разделительная пленка, 5 – дренажные слои, 6 – вакуумный чехол, 7 – абразивная сетка, 8 – герметизирующий жгут

Рисунок 4 – Схема технологического пакета с использованием абразивной сетки и пристыкованного скоса сотового заполнителя

Итак, можно обеспечить локальное увеличение жесткости сотового заполнителя в направлении действия горизонтальной составляющей (что позволит сотам сохранять свою деформационную устойчивость на основании вывода, сделанного в п. 1.1 – выполнение условия:  $\sigma_2 > [\sigma]$ ), а также обеспечить

необходимую силу сцепления сот и обшивки, препятствующую смещению заполнителей. Для обеспечения неподвижности сотоблоков в таком случае должно выполняться условие

$$F_{\text{приж}} \cdot \text{общ} \cdot K_{\text{усл}} \geq F_{\text{зор}} \quad (8),$$

где

$$\begin{aligned} F_{\text{прижобщ}} &= F_{\text{приж1}} + F_{\text{приж2}} = p \times S_1 + p \times S_2 = \\ &= p \times S_1 + p \times \frac{S_2}{\cos \alpha} = p \times \left( S_1 + \frac{S_2}{\cos \alpha} \right) \end{aligned} \quad (9);$$

$$F_{\text{зор}} = p \times \frac{S_2}{\cos \alpha} \times \sin \alpha = p \times S_2 \times \text{tg} \alpha \quad (10).$$

Значит

$$p \times \left( S_1 + \frac{S_2}{\cos \alpha} \right) \times K_{\text{усл}} \geq p \times S_2 \times \text{tg} \alpha \quad (11),$$

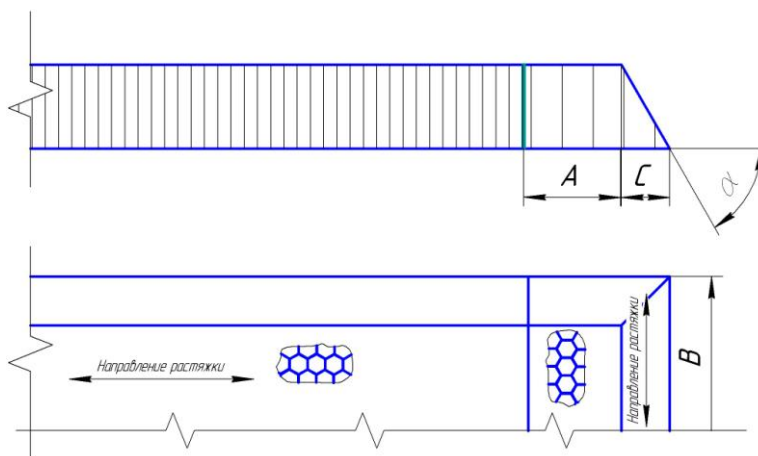
и, решив неравенство (11), получаем

$$\frac{S_1}{S_2} \geq \frac{\sin \alpha - K_{\text{усл}}}{K_{\text{усл}} \times \cos \alpha} \quad (12)$$

или

$$\frac{A}{C} \geq \frac{\sin \alpha - K_{\text{усл}}}{K_{\text{усл}} \times \cos \alpha} \quad (13),$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади,  $A$  и  $C$  – длины прямого и наклонного участков сотоблоков соответственно,  $\alpha$  – угол скоса (рисунок 5),  $K_{\text{усл}}$  – условный коэффициент сцепления.



$A$  – длина прямого участка сот;  $C$  – длина наклонного участка сот (непосредственно скос);

$B$  – ширина

Рисунок 5 – Схема укладки сотового заполнителя

Таким образом для сотовой конструкции с углом скоса  $60^\circ$  для предотвращения смещения сотового заполнителя при формовании можно рекомендовать:

$$\frac{A}{C} \geq \frac{\sin 60 - 0,58}{0,58 \times \cos 60};$$

то есть расчетное соотношение длин прямого и наклонного участка сот должно составлять:

$$\frac{A}{C} \geq 1.$$



## Заключение

1. Проведен анализ факторов, обуславливающих смещение сотового заполнителя в процессе формования трехслойных сотовых конструкций. Главными причинами являются:

- недостаточная сила сцепления материалов;
- недостаточная жесткость сотового заполнителя;

2 Рассмотрены приемы влияния на факторы, обуславливающие смещение сот, пути решения проблемы, в т.ч. из зарубежных источников;

3 В качестве возможного эффективного решения проблемы предложено использовать следующие приемы:

1) для скосов, выходящих на технологический припуск - применение удерживающих и фрикционных материалов: полос из абразивных сеток и перфорированной стальной фольги;

2) применение приема локального увеличения жесткости сотового заполнителя посредством вставки сот с изменением направления растяжки с учетом определенных геометрических соотношений прямых и наклонных участков заполнителей;

4 Проведено экспериментальное подтверждение предложенных технологических приемов.

*Автор выражает благодарность начальнику отд. 48 "ОАО "Компания "Сухой" "ОКБ Сухого" Морозову Б.Б., профессору МАТИ им. К.Э. Циолковского Бухарову С.В. и профессору МАТИ им. К.Э. Циолковского Виноградову В.М.*

### **Библиографический список**

1 Насонов Ф.А. Исследование технологических дефектов деталей из ПКМ. Устранение причин возникновения технологических дефектов. //XXXIX Гагаринские Чтения. Научные труды Международной молодежной конференции в 9 томах. Москва, 9-13 апреля 2013 г.- М.:МАТИ, 2013. Т.1

2 Практическая механика разрушения: уч. пос: в 2 т./ П.И. Котов, А.В. Зинин, С.В. Сухов. – М.: МАТИ, 2012. – Т.2.

3 Duncan M. Stuart// Manual of Aerospace Composites, V.1, 1982