

УДК 629.12: 678.519.92

**В.Е. ГАЙДАЧУК, С.М. МЕЛЬНИКОВ**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГЛАМЕНТАЦИИ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ РАСТЯЖКИ СОТОПАКЕТА**

Проведен анализ возможности регламентации дефектов, возникающих на заключительном этапе изготовления сотового заполнителя – в процессе растяжки сотопакета в сотовлок. Предложена математическая модель растяжки сотопакета, которая позволяет обеспечить остаточное пружинение сотовблока с допуском на угол раскрытия ячеек, соответствующим номинальному или близкому к нему значению физико-механических характеристик сотового заполнителя.

**сотовый заполнитель, нормирование полей допусков, растяжка сотопакета**

### **Введение**

**Постановка проблемы.** Современные и перспективные летательные аппараты (ЛА), являясь одним из самых высокотехнологичных видов техники, требуют колоссальных затрат, связанных с их производством и функционированием. Известно [1], что стоимость 1 кг полетной массы современного самолета колеблется в пределах 1...1,5 тыс. USA \$, а космических аппаратов – 10...100 тыс. USA \$.

В связи с этим снижение массы конструкций ЛА является актуальной проблемой. Решение этой проблемы связано с применением новых конструкционных материалов на основе сверхпрочных сплавов, композиционных материалов в рамках разработки эффективных конструктивно-технологических решений (КТР), обеспечивающих высокую несущую способность изделий авиационно-космической техники. Среди таких КТР широкую нишу занимают конструкции с сотовым заполнителем (СЗ) [2 – 3].

В то же время сотовый заполнитель сам является микроконструкцией, реализация высокой потенциальной стабильности которой связана с технологией его производства на всех этапах его изготовления [4].

В свою очередь, реализация эффективных технологических процессов производства СЗ требует раз-

работки научно обоснованных методов нормирования полей допусков на его технологические и конструктивные параметры и физико-механические характеристики (ФМХ) используемых материалов [5]. Таким образом, задача нормирования полей допусков на эти параметры является одной из ключевых составляющих комплексной проблемы создания современных ЛА (рис. 1).

Исходным моментом решения задачи нормирования допусков на параметры СЗ явилась разработка классификаций технологических погрешностей и дефектов, возникающих на всех основных операциях изготовления СЗ и сотовых конструкций [6 – 9], на основе которых было реализовано нормирование полей допусков на параметры ряда операций [10 – 13]. Данная статья посвящена анализу возможности регламентации дефектов, возникающих на заключительном этапе изготовления СЗ – в процессе растяжки сотопакета в сотовлок.

### **Синтез математической модели**

В операции растяжки сотопакета возникают отклонения от нормированных значений кинематических и силовых параметров: пружинение, приводящее к изменению угла раскрытия ячеек  $\beta$  и усилия растяжки  $q$  (рис. 2) [14].

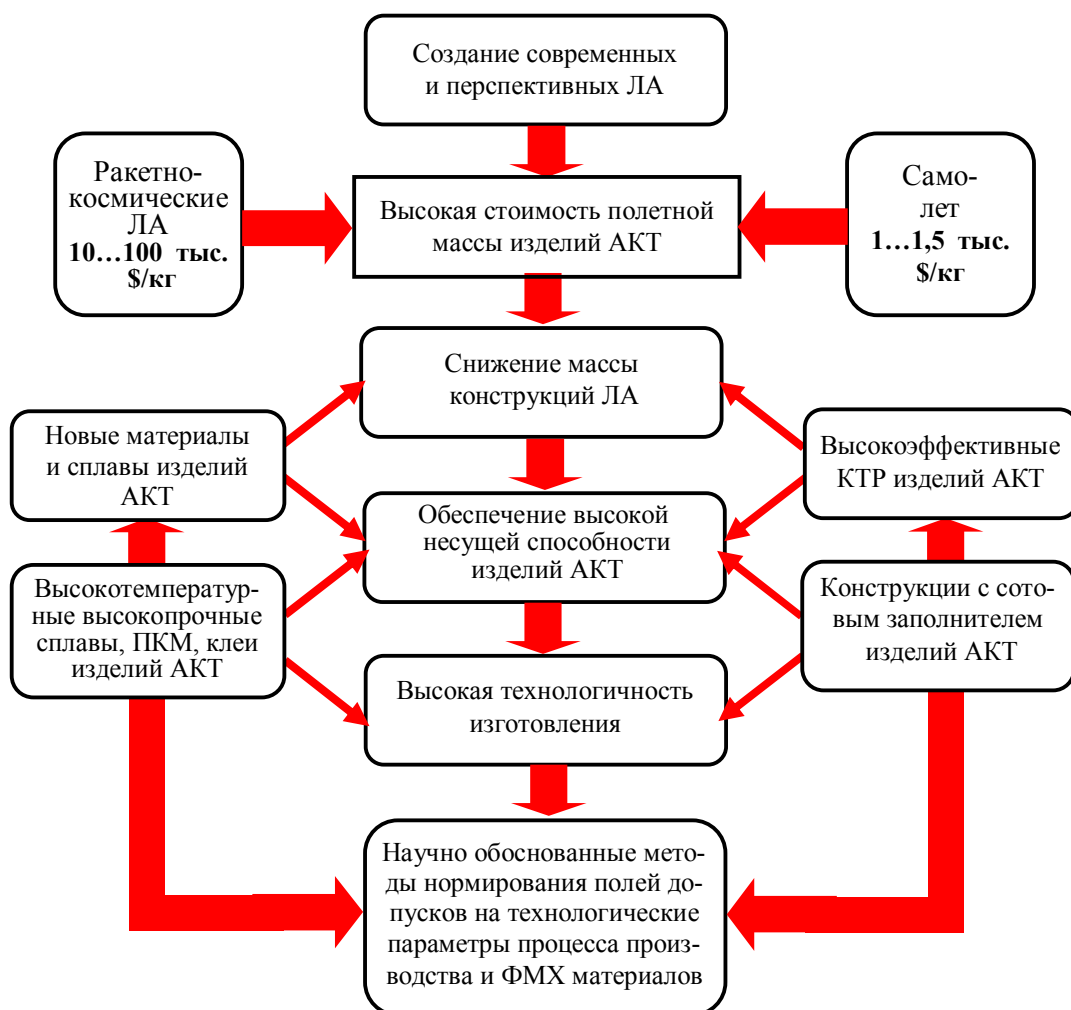


Рис. 1. Место задачи нормирования полей допусков на параметры сотового наполнителя в проблеме создания современных летательных аппаратов

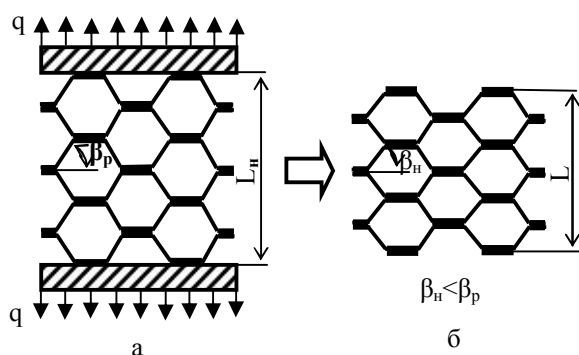


Рис. 2. Схема растяжки сотового пакета:  
а – в момент нагрузки  $q$  ( $\beta_p > \beta_q$ );  
б – после снятия нагрузки

В качестве побочных явлений в процессе растяжки могут возникнуть искажения формы отдельных ячеек при наличии локальных заусенцев, образующихся при фрезеровании сотового блока в размер высоты СЗ  $h$  (смятие одной ячейки с деформациями формы соседних), а также за счет других погрешно-

стей граней. Слипание ячеек должно быть исключено соблюдением ТИ фрезерования сотового блока (полей допусков по скоростям подачи и вращения фрезы и финишной глубины снимаемого слоя).

Строгая математическая модель, описывающая процесс растяжки сотового пакета, весьма сложна, совмещает в себе теоретические гипотезы и использование эмпирических поправочных коэффициентов, что снижает ее точность и делает практически нереализуемыми результаты в силу их зависимости от параметров, число которых приближается к 10 [14].\*)

\*) Квалификационная работа [14] полностью посвящена решению задачи растяжки сотового пакета с учетом пружинения, а результат получен только для ячейки с размером грани  $a_c = 2,5$  мм и представлен в виде графиков, построенных с помощью трудоемкой вычислительной программы, реализованной автором на ЭВМ.

В связи с этим ниже предложена упрощенная математическая модель процесса растяжки. В основу модели положена форма одинарной грани, обрабатываемая ею в процессе растяжки СЗ, наблюдаемая как в эксперименте, так и при расчете МКЭ на ЭВМ (рис. 3).

Причиной изгиба одинарных граней СЗ являются изгибающие моменты, возникающие в торцевых зонах сдвоенных граней  $M$  (рис. 3). В качестве допущений принято, что деформации самих сдвоенных граней от этих моментов малы по сравнению с одинарными, а характер изгиба последней таков, что точка перегиба соответствует середине грани  $a_c$ , причем радиус кривизны  $r$  постоянный.

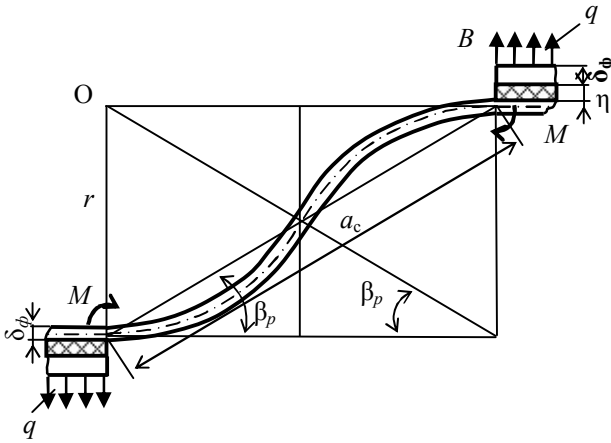


Рис. 3. Схема деформирования одинарной грани СЗ в процессе растяжки сотового пакета

Таким образом, сечение изогнутой срединной поверхности одинарной грани описывается уравнением

$$y'' = \frac{1}{r} = \frac{M}{EI} = \frac{12M}{E^* h \delta_{\phi}^3}, \quad (1)$$

где  $E^*$  — модуль материала грани, соответствующий уровню напряжений, возникающих от моментов  $M$  на диаграмме  $\sigma - \varepsilon$ .

Упрощенный вид диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  для фольги АМг-2Н показан на рис. 4.

Так как максимальные напряжения  $\sigma_p$  в растянутом слое изгибаемой грани равны

$$\sigma_p = \frac{6M}{h \delta_{\phi}^2}, \quad (2)$$

то с учетом (1) получим

$$\sigma_p = E^* \frac{\delta_{\phi}}{r}. \quad (3)$$

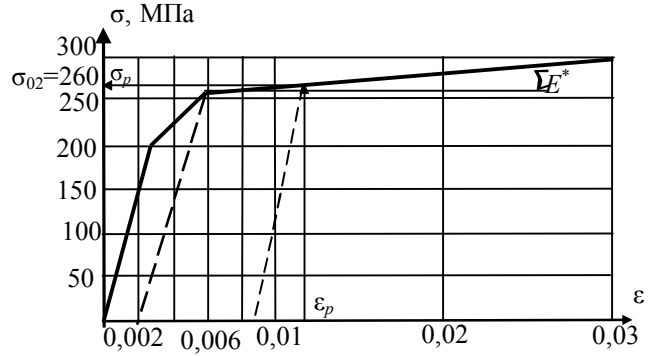


Рис. 4. Диаграмма  $\sigma - \varepsilon$  при растяжении фольги АМг-2Н

Радиус кривизны (рис. 3) равен

$$r = 2a_c \cos \beta_p, \quad (4)$$

где  $\beta_p$  — угол раскрытия ячейки при действии нагрузки  $q$  (рис. 3).

Тогда с учетом выражения (4) выражение (3) преобразуется к виду

$$\sigma_p = E^* \frac{\delta_{\phi}}{2a_c \cos \beta_p} = E^* \varepsilon_p, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_p$  — максимальная деформация растяжения грани при угле раскрытия ячейки  $\beta_p$ .

После снятия усилий растяжения сотового пакета остаточная деформация  $\varepsilon_{ост}$  будет равна

$$\varepsilon_{ост} = \varepsilon_p - \varepsilon_{0,2} = \frac{\delta_{\phi}}{2a_c \cos \beta_{ост}}, \quad (6)$$

где  $\beta_{ост}$  — угол пружинения, образующийся после снятия усилия — остаточный угол раскрытия ячейки сотового наполнителя.

Из (6) получим

$$\cos \beta_{ост} = \frac{\delta_{\phi}}{2a_c (\varepsilon_p - \varepsilon_{0,2})}. \quad (7)$$

Линейное пружинение сотоблока, т.е. сокращение его длины  $L_p$  до величины  $L_{ocm}$  будет равно (рис. 3):

$$\Delta L = \pm(L_{зад} - L_{ocm}) = \pm 2a_c n (\sin \beta_{зад} - \sin \beta_{ocm}), \quad (8)$$

где  $n$  – число рядов ячеек сотового заполнителя на длине сотоблока.

Рассмотрим пример.

Пусть сотоблок, состоящий из 100 рядов ячеек СЗ с параметрами  $\delta_\phi = 0,03$  мм и  $a_c = 5$  мм, растянут на угол  $\beta_{зад} = 60^\circ$  (до правильной шестигранной формы).

Тогда из (5)  $\varepsilon_p = 0,006$ , что соответствует на диаграмме рис. 4 следующим условиям:

$$\sigma_p > \sigma_{0,2}; \quad \varepsilon_{ocm} = 0,006 - 0,002 = 0,004.$$

Из (6) находим:

$$\begin{aligned} \cos \beta_{ocm} &= 0,75; \quad \beta_{ocm} = 0,665; \\ \sin \beta_{ocm} &= 0,665; \quad \sin \beta_{зад} = \sin 60^\circ = 0,866; \\ \Delta L &= 200 \text{ мм при } L_p = 200 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Таким образом, погрешность длины сотоблока относительно потребной  $L_{зад}$  составит 23%.

Кроме того, при прочих равных условиях для  $E_{np-z}$  погрешность составит 10%, для  $G_{xz}$  – 34%, для  $G_{yz}$  – 52%.

Такого же порядка составляют потенциальные погрешности других ФМХ СЗ ( $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\sigma_{-ez}$ ).

Приведенный пример свидетельствует о необходимости исключения или существенного снижения линейного пружинения  $\Delta L$  путем соответствующего выбора  $\beta_p$  больше заданного (регламентированного)  $\beta_{зад}$ .

Этот выбор реализуется итерационным процессом по следующему алгоритму.

1. Задается  $\beta_{p1}$  заведомо больший искомого  $\beta_{зад}$ .

2. По формуле (5) определяется  $\varepsilon_{p1}$  первого приближения.

3. По формуле (6) определяются  $\cos \beta_{ocm1}$  и  $\beta_{ocm1}$  первого приближения.

4. Значение  $\beta_{ocm1}$  сравнивается с искомым  $\beta_{зад}$ . Если  $\beta_{ocm1} > \beta_{зад}$ , задается  $\beta_{p2} < \beta_{p1}$ . Если  $\beta_{ocm1} < \beta_{зад}$ , задается  $\beta_{p2} > \beta_{p1}$ .

5. Повторяются шаги 2 – 4. Процесс продолжается до тех пор, пока  $\beta_{ocmi} < (\beta_{зад} \pm \Delta\beta)$ , где  $\Delta\beta$  – наперед заданная допускаемая по условиям принятого допуска на критичную ФМХ сотового заполнителя.

Определенное по (8) линейное пружинение сотоблока при известных параметрах  $a_c$ ,  $n$  и  $\beta_{ocmi} = (\beta_{зад} \pm \Delta\beta)$  принимается в качестве поля допуска для данного сотоблока.

Силовой параметр растяжки – сила  $P$ , необходимая для растяжки сотопакета в сотоблок толщиной  $h$ , равна

$$P = qha_c n. \quad (9)$$

Параметр  $q$  определится из соотношения

$$M = \frac{qa_c^2 h \cos \beta_p}{4}. \quad (10)$$

Выражая в (10)  $M$  через  $\sigma_p$  в соответствии с (2), а затем  $\sigma_p$  соотношением (5), получим

$$q = \frac{2}{3} E^* \left( \frac{\delta_\phi}{a_c} \right)^2 \frac{\varepsilon_p}{\cos \beta_p} < \sigma_{en}. \quad (11)$$

Тогда сила  $P$  будет равна

$$P = \frac{2}{3} \frac{E^* \delta_\phi^2 \varepsilon_p h}{a_c \cos \beta_p} n. \quad (12)$$

В (11) – (12) модуль  $E^*$  определяется из диаграммы рис. 4 при найденном  $\varepsilon_p$ .

Поле допуска  $\Delta P$  находится при ранее установленных  $\Delta\delta_\phi$ ,  $\Delta a_c$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta\beta$ .

## Выводы

Предложена, обоснована и реализована математическая модель растяжки сотопакета в сотоблок, позволяющая обеспечить в заранее нормированных полях допуска остаточное пружинение сотоблока, гарантирующее получение ячеек с допуском на угол их раскрытия, который соответствует номинальному или близкому к нему значению физико-механических характеристик сотового заполнителя.

Обеспечение заданного угла раскрытия ячейки реализовано предложенным итерационным методом решения задачи установления зависимости между переменными параметрами растяжки ячейки с учетом нелинейности диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  фольги. Получена зависимость необходимого усилия растяжки сотопакета от геометрических параметров ячейки, ширины сотоблока и соответствующих им характеристик диаграммы деформирования фольги. Эта зависимость позволяет нормировать поле допуска потребного усилия растяжения сотопакета при ранее установленных полях допусков на геометрические параметры ячейки и сотоблока.

Таким образом, в совокупности с результатами работ [7, 10 – 13] обоснованы нормируемые поля допусков на основные дефекты формы ячеек СЗ и связанные с ними параметры соответствующих операций технологического процесса изготовления сотового заполнителя, что решает задачу нормирования полей допусков при изготовлении СЗ для прецизионных и ответственных конструкций авиакосмической техники.

## Литература

1. Оборонно-промышленный комплекс Украины – современное состояние и реструктуризация / В.П. Горбулин, А.С. Довгополь, О.И. Приходько, В.П. Степанов, В.А. Смелов и др. // Технологические системы: Научно-технический журнал. – 2001. – 2(8). – С. 5-20.

2. Иванов А.А., Кашин С.М., Семенов В.И. Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 436 с.

3. Сливинский В.И., Ткаченко Г.В., Колоскова А.Н. Объективные предпосылки эффективного применения сотовых конструкций // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2001. – Вып. 25 (2). – С. 109-115.

4. Колоскова А.Н., Грицкий Л.Н. Влияние погрешностей изготовления сотового заполнителя на прочностные характеристики трехслойной панели // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2002. – Вып. 31 (4). – С. 64-68.

5. Гайдачук В.Е., Мельников С.М. О проблеме допусков в технологической механике сотовых заполнителей и конструкций // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2004. – Вып. 39 (4). – С. 35-48.

6. Гайдачук А.В., Сливинский М.В. Технологические дефекты сотовых конструкций из композиционных материалов // Труды Всероссийской НТК «Новые материалы и технологии» – НТМ-2004. – М.: «МАТИ» – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского, 2004. – С. 79-80.

7. Мельников С.М. Многоуровневая классификация дефектов сотовых заполнителей из металлической фольги и вытекающие из нее задачи определения их полей допусков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2005. – Вып. 41 (2). – С. 88-100.

8. Мельников С.М. Классификация дефектов обшивок сотовых конструкций и задачи определения их полей допусков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2005. – Вып. 42 (3). – С. 82-93.

9. Мельников С.М. Дефекты, возникающие в процессе обезжиривания фольги при изготовлении сотового заполнителя // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2005. – Вып. 43 (4). – С. 96-102.

10. Мельников С.М. Взаимосвязь полей допусков на прочность клея при неравномерном отрыве и его нанос на фольгу в производстве сотовых заполнителей // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2006. – Вып. 1 (44). – С. 114-119.

11. Кириченко В.В., Мельников С.М. Факторы, определяющие технологическую погибь граней ячеек сотового заполнителя из металлической фольги и возможности ее нормирования // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных

аппаратов: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2006. – Вып. 2 (45). – С. 62-70.

12. Мельников С.М. Анализ влияния дефектов металлической фольги в состоянии поставки на физико-механические характеристики сотового заполнителя // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2006. – Вып. 3 (46). – С. 72-82.

13. Мельников С.М. Дефекты формы ячейки сотового заполнителя, возникающие в процессе формообразования сотового пакета, и их регламентация // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: НАКУ «ХАИ», 2006. – Вып. 33. – С. 194-200.

14. Зак М.И. Исследование, разработка и автоматизация процесса растяжки сотовых блоков в производстве летательных аппаратов: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.07.04. – М.: МАИ, 1980. – 19 с.

*Поступила в редакцию 7.08.2006*

**Рецензент:** канд. техн. наук, проф. В.В. Кириченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.