

Об'єктивними передумовами більш ефективного застосування стільникових конструкцій у ряді галузей промисловості є не тільки вже реалізовані і доведені їх переваги, але і вирішення низки проблем. Незалежно від того, чи виготовляється стільниковий заповнювач безпосередньо на підприємстві або купується перед формуванням конструкції, він піддається тим чи іншим технологічним операціям. В процесі цих операцій змінюються деякі з його геометричних параметрів, а, отже, і фізико-механічні характеристики. В статті проведено дослідження забезпечення фізико-механічних характеристик стільникових заповнювачів в тих випадках, коли його характеристики виходять за рамки допустимих значень внаслідок певних відхилень в геометрії стільників, що підлягають цілеспрямованому коригуванню в процесі виготовлення цього матеріалу. З умов міцності стільникового заповнювача на рівномірний відрив в процесі розтягування пакета в блок проведено корекцію його фізико-механічних характеристик шляхом забезпечення регламентованого діапазону кута розтяжки чарунки стільників в межах заданої області коефіцієнтів зміни її форми.

Отримано регламентований зв'язок між технологічними параметрами та кутом розтяжки стільникового пакета і коефіцієнтом зміни форми чарунки. Залежність дозволяє виявити потрібний діапазон технологічних параметрів для реалізації необхідних по регламенту фізико-механічних характеристик стільникового заповнювача з заданими вхідними геометричними параметрами його чарунки. Проаналізовано всі існуючі технологічні способи нанесення клейових смуг на матеріал стільникового заповнювача на основі зв'язку між кроком нанесення смуг, коефіцієнтом зміни форми чарунки та розміром її сторони. Отримані результати дозволяють вдосконалити типові технологічні процеси виробництва стільників, що в свою чергу підвищить стабільність фізико-механічних характеристик стільникового заповнювача та конструкцій на його основі

Ключові слова: стільниковий заповнювач, корекція фізико-механічних характеристик, технологія, кут розкриття чарунки, коефіцієнт форми

УДК 629.12.023

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.143674

СТАБИЛИЗАЦІЯ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КОРРЕКЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

А. В. Кондратьев

Доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
Кафедра конструкций

и проектирования ракетной техники
Национальный аэрокосмический университет
им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»
ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070
E-mail: a.kondratiev@khai.edu

О. А. Пронцевич

Кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник

Отдел физико-химических методов контроля
материалов и элементов конструкций
Государственное предприятие «Конструкторское
бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»
ул. Криворожская, 3, г. Днепр, Украина, 49008

1. Введение

В ряде отраслей промышленности широкое применение получили трехслойные (сэндвичевые) конструкции с сотовым наполнителем (СЗ) [1, 2]. Уникальный комплекс прочностных, технологических и эксплуатационных характеристик сотовых конструкций предопределяет их все более широкое применение. При этом номенклатура узлов и деталей, наряду со слабонагруженными, включает высоконагруженные силовые конструкции ответственного назначения [3, 4]. Объективными предпосылками для более эффективного применения сотовых конструкций является не только уже реализованные и доказанные их преимущества, но и решение ряда проблем. Так известно [5, 6], что качество СЗ, его функциональные свойства и их стабильность предопределяются техноло-

гией его изготовления. Ярко выраженная технологическая наследственность СЗ может приводить к существенным изменениям функциональных свойств конструкций на его основе. Вследствие этого возникает необходимость стабилизация качества и эксплуатационных характеристик сот и конструкций на их основе путем установления технологических способов, обеспечивающих реализацию искомой допустимой области регламентируемых физико-механических характеристик (ФМХ) СЗ.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Специфика СЗ заключается в следующем. Независимо от того, производятся соты непосредственно на

предприятию или приобретаются перед формированием конструкции, они подвергается тем или иным технологическим операциям (например, растяжка сотового блока и др.). В процессе этих операций изменяются некоторые из геометрических параметров сотового наполнителя, а, следовательно, и его ФМХ [6, 7]. В настоящее время существуют аналитические зависимости, связывающие ФМХ и прочностные характеристики СЗ с геометрическими параметрами ячейки и свойствами материалов сот. Однако такие зависимости дают возможность лишь выбрать приемлемые поля технологических допусков исходя из уровня ответственности при проектировании сотовых конструкций [7, 8]. Полученные данные возможно согласовать (уточнить) только со справочными или паспортными характеристиками того или иного СЗ [9–11]. До последнего времени в работах [12–14], а также в производственных инструкциях и других технологических документах в основном только фиксировались дефекты, полученные на практике при реализации тех или иных технологических процессов, реализованных на конкретном оборудовании и установках [15, 16]. К числу работ, посвященных установлению технологических способов, обеспечивающих реализацию искомой допустимой области регламентируемых ФМХ СЗ, в первую очередь, следует отнести работы [17–22]. Так, в работе [17] приведена оригинальная математическая модель, описывающая процесс растяжки сотового пакета. В ней приведены аналитические и эмпирические зависимости для определения угла раскрытия ячейки СЗ β при растяжении сотового блока как функции силовых параметров и ФМХ СЗ. Однако эти зависимости позволили лишь установить допуск на дефект $\Delta\beta$. Практическое использование этих зависимостей вызывает большие трудности. Полученные результаты также ограничены лишь несколькими типоразмерами ячеек СЗ. Использование предложенных в этой работе эмпирических поправочных коэффициентов делает практически нереализуемыми результаты в силу их зависимости от параметров, число которых приближается к 10. Так, в работе [18] отклонения в толщине клея и шаге клеевых полос приводятся для методов высокой, глубокой и трафаретной печати в зависимости от скорости процесса нанесения клея.

В работах [18, 19] разработаны модели и методы нормирования полей допусков на дефекты ячеек СЗ, позволившие установить зависимость ФМХ СЗ от геометрических параметров ячейки и свойств фольги и соответствующие поля допусков на эти характеристики. Работы [20, 21] посвящены разработке научно обоснованных технологических методов снижения дефектов и повышения показателей качества СЗ из полимерных бумаг и их ФМХ. Обобщением этих работ является монография [7], которая посвящена разработке научно обоснованных методов нормирования полей допусков на технологические параметры основных операций процесса изготовления СЗ из различных материалов и возникающие в них дефекты.

Работа [22] содержит новые теоретические и практические результаты исследований возможностей учета при проектировании трехслойных панелей с СЗ технологических несовершенств его изготовления. Предложена методика оптимизации допусков на изготовление СЗ трехслойной панели с обеспечением заданной несущей способности конструкции. Однако предложенный подход к нормированию допусков на параметры формы

ячейки ориентирован не на технологические возможности осуществления соответствующих операций процесса изготовления СЗ. Он лишь направлен на обеспечение регламентированного отклонения несущей способности конкретной сотовой конструкции. Поэтому, являясь, несомненно, полезным для этапа проектирования сотовых конструкций, этот подход не решает проблему нормирования допусков в производстве СЗ.

Из краткого анализа приведенных выше публикаций следует, что в настоящее время в той или иной степени решена проблема совершенствования конструкций с СЗ. В связи с этим важной представляется задача разработки методов прогнозирования обеспечения всех регламентированных ФМХ СЗ для тех случаев, когда одна или несколько его характеристик выходят за рамки допустимых значений.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является установление технологических способов, обеспечивающих стабилизацию качества и эксплуатационных характеристик СЗ и конструкций на его основе. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

- провести математическое моделирование технологических способов коррекции ФМХ СЗ по результатам реализации метода наложения матриц;
- исследовать обеспечение всех регламентированных ФМХ СЗ в тех случаях, когда одна или несколько его характеристик выходят за рамки допустимых значений вследствие определенных отклонений в геометрии сот.

4. Материалы и методы исследований

При разработке и реализации математической модели растяжки сотового пакета в сотовый блок, методов определения полей допусков на технологические параметры процесса производства СЗ применялись методы технологической механики, математического анализа, компьютерных технологий и аналоговые методы. Они базируются на общепризнанных методах строительной механики, сопротивления материалов, параметрического трехмерного моделирования с помощью метода конечных элементов. Для метода целенаправленной корректировки ФМХ СЗ и их прочности использованы откорректированные аналитические модели, связывающие свойства материала сот и их селективный отбор с геометрическими параметрами и характеристиками технологического процесса формирования СЗ.

Доказательством обоснованности выводов, сделанных в работе, является адекватность расчетных моделей и данных, полученных при испытаниях типовых образцов СЗ и конструкций на его основе.

5. Результаты исследований технологических способов коррекции ФМХ СЗ

Среди множества видов СЗ, отличающихся конфигурацией ячеек и технологией производства [1, 2], наибольшее распространение получили шестигранные соты. Такие соты обычно образуются после сборки сотового пакета,

его склейки и растяжки в шестигранную ячейку (рис. 1), в общем случае неправильной формы, переходящую в правильный шестигранник при угле раскрытия ячейки $\beta=60^\circ$.

Однако следует отметить, что данный метод имеет существенное отличие для алюминиевой фольги и полимерной бумаги, что требует отдельного анализа их технологических процессов [6, 7, 15].

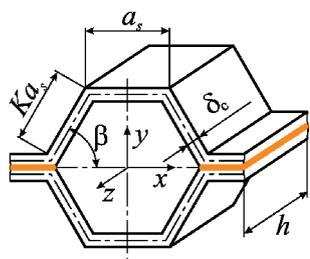


Рис. 1. СЗ с шестигранной формой ячейки: a_s – ширина сдвоенной ячейки; K – коэффициент формы ячейки; β – угол раскрытия ячейки; δ_c – толщины материала сот

Форма ячейки СЗ, показанная на рис. 1, получена в результате нанесения на рулонную фольгу с помощью формного цилиндра полосы клея шириной a_s с шагом t , последующего совмещения рулонного материала в пакет со смещением в шахматном порядке полос клея на половину шага, т. е. $t/2$ (рис. 2).

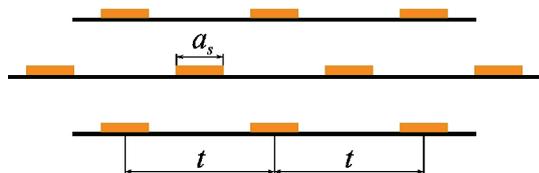


Рис. 2. Формирование сотопакета

В работах [7, 23] на частном примере показана реализация метода наложения матриц ФМХ и прочности СЗ для выявления их зоны, в которой все эти свойства удовлетворяют требованиям определенного регламента или стандарта. Этой зоне соответствует сравнительно узкий интервал изменения параметров угла раскрытия СЗ $\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}$, реализуемый для определенного диапазона коэффициентов изменения формы ячейки СЗ $K_{\min} \leq K \leq K_{\max}$ (табл. 1).

Однако для технологической реализации этих диапазонов β и K необходимо обосновать соответствующие способы, обеспечивающие их получение.

Для этого целесообразно рассмотреть условия получения потребного (регламентированного) значения β , при растяжении сотопакета.

Усилие, прикладываемое к клеевому соединению на площадке стороны одной ячейки $4a_s h$, необходимое для перемещения площадки от первоначального положения (не растянутый пакет) на расстояние $a_s K \sin \beta$, для случая ячейки неправильной шестигранной формы выражается формулой (рис. 3) [7]:

$$P_t = \frac{4M_p}{a_s} + \frac{4M_p \beta}{a_s K \sin \beta}, \tag{1}$$

где M_p – пластический погонный изгибающий момент; $0 < \beta \leq \pi/2$ – угол изгиба, a_s – ширина сдвоенной ячейки; K – коэффициент формы ячейки; h – высота сотового заполнителя (рис. 1).

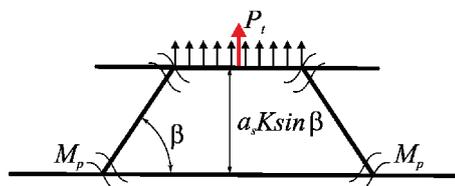


Рис. 3. Изгиб фольги при образовании элементарной ячейки

Поскольку:

$$M_p = \frac{\sigma_{ic} h \delta_c^2}{4}, \tag{2}$$

где σ_{ic} – предел текучести материала фольги; h – высота СЗ, мм; δ_c – толщина фольги, то:

$$P_t = \frac{\sigma_{ic} h \delta_c^2}{a_s} + \frac{\sigma_{ic} h \delta_c^2 \beta}{a_s K \sin \beta} = \frac{\sigma_{ic} h \delta_c^2}{a_s} \left(1 + \frac{\beta}{K \sin \beta} \right). \tag{3}$$

Предел прочности клея на растяжение определяется:

$$\frac{P_t}{4a_s h} = \frac{\sigma_{ic} \delta_c^2}{4a_s^2} \left(1 + \frac{\beta}{K \sin \beta} \right) \leq \sigma_{b\eta}. \tag{4}$$

Решая (4) относительно β° (в градусах), получим:

$$\frac{\beta^\circ}{\sin \beta^\circ} = 57,4K \left(\frac{4\sigma_{b\eta} a_s^2}{\sigma_c^2} - 1 \right). \tag{5}$$

Формула (5) дает не выявленную ранее связь между параметрами β и K , отсутствующую в случае правильной шестигранной ячейки ($K=1$).

В данном же общем случае необходима проверка возможности реализации потребного угла раскрытия ячейки β при регламентированном K для данных размеров ячейки a_s толщине фольги δ_c и ее пределом текучести σ_{ic} , а также пределом прочности данного клея на равномерный отрыв $\sigma_{b\eta}$.

Анализ (4) показывает, что оно выполняется при любых значениях входящих в него параметров, лежащих в диапазонах $80 \leq \sigma_{ic} \leq 300$ МПа; $0,03 \leq \delta_c \leq 0,04$ мм и $2 \leq a_s \leq 8$ мм с учетом того, что $\sigma_{b\eta} \geq 17$ МПа.

Из этого следует, что условие прочности клевого соединения фольги при растяжении сотопакета не является критичным и не может быть использовано для установления регламентированного диапазона угла раскрытия ячейки β в зависимости от параметра K .

Таблица 1

Матрица допустимой области искомых параметров β и K СЗ

$\beta \backslash K$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
58°						
60°					допустимая область	допустимая область
62°						допустимая область
64°						

Подойдем к установлению искомой связи параметров β и K в пределах регламентированных диапазонов их взаимного изменения посредством анализа процесса растяжки сотопакетов с учетом его пружинения.

На рис. 4 показана схема растяжения сотопакета в сотоблок.

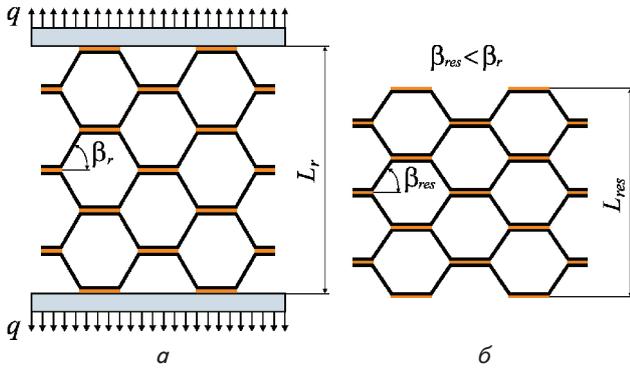


Рис. 4. Схема растяжки сотопакета: а – в момент нагрузки q ($\beta_{res} > \beta_r$); б – после снятия нагрузки

Для исследования процесса растяжки сотопакета воспользуемся математической моделью, предложенной ранее в [18] и обобщенной [7], развив ее для ячейки СЗ неправильной шестигранной формы ($K \neq 1$). В основу модели положена форма одинарной грани, обретаемая ею при растяжке СЗ, наблюдаемая как в эксперименте, так и при конечно-элементных расчетах (рис. 5).

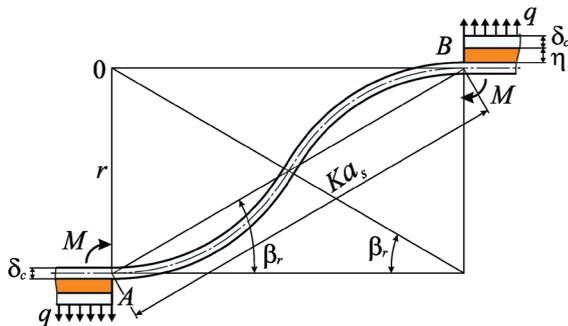


Рис. 5. Схема деформирования одинарной грани СЗ в процессе растяжки сотопакета

Причиной изгиба одинарных граней СЗ являются изгибающие моменты, возникающие в торцевых зонах двоянных граней M (рис. 5). Принято допущение, что деформации самих двоянных граней в отличие от одинарных малы, а характер изгиба последней таков, что точка перегиба соответствует середине грани a_s , причем радиус кривизны r постоянный.

Таким образом, сечение изогнутой средней поверхности одинарной грани описывается уравнением [24]:

$$y'' = \frac{1}{r} = \frac{M}{EI} = \frac{12M}{E^* h \delta_c^3}, \quad (6)$$

где E^* – модуль материала грани, соответствующий уровню высоких напряжений, возника-

ющих от моментов M на диаграмме σ – ϵ . Упрощенный вид диаграммы σ – ϵ в нелинейной области для алюминиевой фольги показан на рис. 6 [25, 26].

Поскольку максимальные напряжения σ_b в растянутом слое изгибаемой грани равны:

$$\sigma_b = \frac{6}{h \delta_c^2}, \quad (7)$$

то с учетом (7) из (6) получим:

$$\sigma_b = E^* \frac{\delta_c}{r}. \quad (8)$$

Радиус кривизны (рис. 4) равен:

$$r = 2a_s K \cos \beta_r, \quad (9)$$

где β_r – угол раскрытия ячейки при действии нагрузки q (рис. 5).

С учетом (9) выражение (8) преобразуется к виду:

$$\sigma_b = E^* \frac{\delta_c}{a_s K \cos \beta_r} = E^* \epsilon_r, \quad (10)$$

где ϵ_r – максимальная деформация растяжения грани при угле раскрытия ячейки β_r .

После снятия усилий растяжения сотопакета остаточная деформация ϵ_{res} будет равна:

$$\epsilon_{res} = \epsilon_r - \epsilon_{0,2} = \frac{\delta_c}{a_s K \cos \beta_{res}}, \quad (11)$$

где β_{res} – остаточный угол раскрытия ячейки СЗ (угол пружинения, образующийся после снятия усилия).

Из (11) получим:

$$\cos \beta_{res} = \frac{\delta_c}{a_s K (\epsilon_r - \epsilon_{0,2})}. \quad (12)$$

С учетом (10) преобразуем (12) к виду:

$$\beta_{res} = \arccos \left[\frac{\delta_c}{\frac{\delta_c}{\cos \beta_r} - a_s K \epsilon_{0,2}} \right]. \quad (13)$$

Зависимость (13) устанавливает искомую связь между параметрами β и K в пределах регламентированных диапазонов их взаимного изменения.

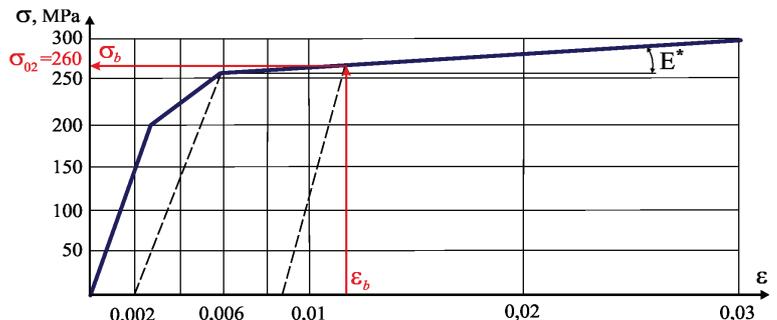


Рис. 6. Диаграмма σ – ϵ при растяжении алюминиевой фольги

Таким образом, есть основания считать обоснованным представление математической модели в виде зависимостей (5) и (13), так как благодаря именно такому представлению становится возможным увязать существующие технологические способы нанесения клеевых полос на материал СЗ с геометрическими параметрами получаемого заполнителя. Это в итоге позволило исследовать обеспечение ФМХ СЗ в тех случаях, когда его характеристики выходят за рамки допустимых значений вследствие определенных отклонений в геометрии сотов, подлежащих целенаправленной корректировке в процессе изготовления этого материала.

Диапазон коэффициента изменения формы ячейки СЗ $1,47 \leq K \leq 1,65$ (табл. 1), в котором все параметры должны были бы обеспечивать ФМХ СЗ, соответствующие нормативной документации при $\delta_{cc} = 0,03$ мм, $\epsilon_{0,2} = 0,002$, $a_{sc} = 2$ мм, $50,2^\circ \leq \beta_{res}^\circ \leq 51,3^\circ$. Однако, как видно из табл. 1, в действительности, по изложенной методике с принятой точностью следующих из нее формул, уровень всех ФМХ данного СЗ не обеспечивается.

При этом значения модулей упругости и предела прочности при сдвиге G_{xz} , G_{yz} , F_{xz} значительно превышают, а $\rho_{сз}$ ниже регламентированных значений при недостаточном значении F_{yz} , равном 0,8 МПа, вместо требуемого $F_{yz} = 0,9$ МПа и полученным экспериментально $F_{yz}^{exp} = 1,18$ МПа [7, 23].

Очевидно, формула (13) требует корректировки, обеспечивающей увеличения β_{res} . Это будет иметь место при задании β_r с положительным допуском $\Delta\beta_r = 5...6^\circ$, т. е.

$$\beta_{res} = \arccos \left[\frac{\delta_c}{\frac{\delta_c}{\cos(\beta_r + \Delta\beta_r)} - a_s K \epsilon_{0,2}} \right]. \quad (14)$$

При задании $\Delta\beta_r = 6^\circ$ и исходных значениях входящих параметров получим $60,5^\circ \leq \beta_{res}^\circ \leq 61,2^\circ$ и все значения ФМХ СЗ входят в диапазон, определяемый табл. 1 [7, 23].

Связь между шагом нанесения клеевых полос t и коэффициентом формы ячейки СЗ (рис. 2) имеет следующий вид:

$$t = 2a_s(1 + K \cos\beta). \quad (15)$$

Решая ее относительно K , получим:

$$K = \left(\frac{t}{2a_s} - 1 \right) \frac{1}{\cos(\beta_r + \Delta\beta_r)}. \quad (16)$$

Подставляя (16) в (14), получим связь между углом β_{res} и шагом t :

$$\beta_{res} = \arccos \left[\frac{2\delta_c \cos(\beta_r + \Delta\beta_r)}{2\delta_c - \epsilon_{0,2}(t - 2a_s)} \right]. \quad (17)$$

При прежних исходных данных и $t = 10$ мм получим $\beta_{res} = 59,5^\circ$ близкий к диапазону углов раскрытия, выявленных выше.

Однако для полного соответствия угла β_{res} диапазону $60,5^\circ \leq \beta_{res}^\circ \leq 61,2^\circ$ шаг t должен отличаться от постоянного значения $t = 10$ мм, постулированного ранее.

Решая (17) относительно t , получим:

$$t = 2 \left[a_s + \frac{\delta_c}{\epsilon_{0,2}} \left(1 - \frac{\cos(\beta_r + \Delta\beta_r)}{\cos\beta_{res}} \right) \right]. \quad (18)$$

Подставив в (18) $\beta_{res} = 59,5^\circ$ при прежних исходных данных получим $t = 9,4$ мм.

В работе [7] получена зависимость:

$$y_\eta = \frac{a_s \eta \rho_\eta}{(a_s + t)}, \quad (19)$$

связывающая массовый нанос клея y_η с толщиной клеевого слоя η , плотностью клеевого слоя ρ_η , шириной клеевой полосы, принимаемой равной стороне ячейки СЗ a_s и шагом клеевых полос t .

Решая (19) относительно шага t , получим:

$$t = a_s \left(\frac{\eta \rho_\eta}{y_\eta} + 1 \right). \quad (20)$$

6. Обсуждение результатов анализа существующих технологических способов формирования сот на разных стадиях их изготовления

Проведенное выше исследование позволило математически смоделировать основные технологических способов коррекции ФМХ СЗ по результатам реализации метода наложения матриц. В отличие от работ [7, 23], где был предложен и реализован частный метод целенаправленной корректировки ФМХ СЗ, полученные результаты позволили непосредственно установить однозначный технологический способ, обеспечивающий реализацию необходимой допустимой области регламентируемых свойств. Для этого была установлена ранее не выявленная связь между регламентированным диапазоном углов растяжения ячейки сот неправильной шестигранной формы с коэффициентом изменения формы ячейки (5). Зависимость получена на основе выполнения условия прочности СЗ на равномерный отрыв в процессе растяжения сотопакета в сотоблок (4). В основу модели положена форма одинарной грани, обретаемая ею при растяжке СЗ, наблюдаемая как в эксперименте, так и при конечно-элементных расчетах. В отличие от результатов работ [7, 18] предложенная математическая модель учитывает способ формирования СЗ с ячейкой в общем случае неправильной шестигранной формы.

Коррекция ФМХ СЗ путем реализации связи угла раскрытия ячейки с шагом нанесения клеевых полос показала, что полученное условие (4) выполняется во всем диапазоне возможных изменений геометрических и прочностных параметров составляющих СЗ (клея и фольги). Вследствие этого критерий (5) не позволил установить (регламентировать) диапазон взаимно однозначной зависимости параметров β и K . Для этого была исследована возможность получения регламентирующей связи между углом растяжки сотопакета и коэффициентом изменения формы ячейки, обеспечивающей реализацию требуемых ФМХ СЗ. В отличие от работ [18, 19], позволивших установить зависимость ФМХ СЗ только от геометрических параметров ячейки, свойств фольги и полей допусков на эти характеристики, полученная

зависимость позволила выявить их потребный диапазон для реализации необходимых по регламенту ФМХ СЗ с заданными входными параметрами. Так, при задании $\Delta\beta_r = 6^\circ$ и исходных значениях входящих параметров было получено, что $60,5^\circ \leq \beta_{res}^\circ \leq 61,2^\circ$ и все значения ФМХ СЗ входят в диапазон, определяемый табл. 1.

Исследование диапазонов возможного изменения шага клеевых полос t в зависимости от способа нанесения клея [2, 7, 12] показало следующее.

При глубокой печати параметры, входящие в (20), изменяются в диапазонах:

$$0,003 \leq \eta \leq 0,005 \text{ мм; } (15 \leq y \leq 17) \cdot 10^{-7} \text{ г/мм}^2;$$

$$\rho_\eta = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3.$$

При этих параметрах и диапазоне изменения a_s , $1,9 \leq a_s \leq 2,1$ мм получаем диапазон возможных изменений шага нанесения клеевых полос $6,9 \leq t \leq 11,2$ мм.

При высокой печати:

$$0,008 \leq \eta \leq 0,018 \text{ мм; } (50 \leq y \leq 85) \cdot 10^{-7} \text{ г/мм}^2;$$

$$a_s = a_{sc} \pm 0,6 \text{ мм,}$$

т. е. $1,4 \leq a_s \leq 2,6$ мм из (19) получаем $3,1 \leq t \leq 14,8$ мм.

При истечении:

$$0,01 \leq \eta \leq 0,05 \text{ мм; } (60 \leq y \leq 230) \cdot 10^{-7} \text{ г/мм}^2;$$

$$1,6 \leq a_s \leq 2,4 \text{ мм}$$

из (19) получаем $2,5 \leq t \leq 28,4$ мм.

При трафаретной печати

$$0,01 \leq \eta \leq 0,17 \text{ мм; } (60 \leq y \leq 80) \cdot 10^{-7} \text{ г/мм}^2;$$

$$1,6 \leq a_s \leq 2,4 \text{ мм}$$

из (19) диапазон изменения шага t $4,2 \leq t \leq 11,24$ мм.

Проведенный анализ способов нанесения клеевых полос позволил показать следующее:

– полную непригодность устаревшего способа истечения в связи с возможным диапазоном изменения шага клеевых полос при характерных на практике отклонениях

от среднего значения других параметров ячейки СЗ, а, следовательно, и ФМХ СЗ;

– способ высокой печати по широте диапазона изменения шага нанесения клеевых полос неприемлем для СЗ, применяемых для современных конструкций;

– предпочтительным способом нанесения клеевых полос для СЗ ответственных изделий является способ глубокой печати.

Возможности получения более высоких ФМХ СЗ, по-видимому, реализуются на входном контроле материалов основы СЗ с помощью их селективного отбора [27].

Полученные результаты в итоге позволяют усовершенствовать типовые технологические процессы производства сот, что в свою очередь повысит их качество и эксплуатационные характеристики. Они не позволяют непосредственно установить однозначный технологический способ, обеспечивающий реализацию искомой допустимой области регламентируемых ФМХ СЗ. Вследствие этого необходимость анализа существующих и перспективных технологических способов формирования СЗ на различных стадиях его изготовления остается.

7. Выводы

1. Проанализированы, выявлены и рекомендованы технологические способы коррекции ФМХ СЗ по результатам реализации метода наложения матриц, обеспечившие создание сот с повышенными функциональными характеристиками.

2. Исследована возможность коррекции ФМХ СЗ на разных стадиях их изготовления. Так обеспечение необходимого уровня ФМХ СЗ достигается регламентированным диапазоном угла раскрытия ячейки сот $60,5^\circ \leq \beta_{res}^\circ \leq 61,2^\circ$ в пределах заданной области коэффициентов изменения формы $1,47 \leq K \leq 1,65$. Коррекция ФМХ СЗ путем реализации связи угла раскрытия ячейки с шагом нанесения клеевых полос показала, что полное соответствие диапазону $60,5^\circ \leq \beta_{res}^\circ \leq 61,2^\circ$ достигается при шаге $t = 9,4$ мм. Исследование возможности коррекции ФМХ СЗ с помощью минимизации отклонения шага нанесения клеевых полос при различных технологических способах нанесения клея на фольгу показало, что предпочтительным способом нанесения клеевых полос для СЗ ответственных изделий является лишь способ глубокой печати.

Литература

1. Панин В. Ф., Гладков Ю. А. Конструкции с наполнителем. Москва, 1991. 272 с.
2. Astrom B. T. Sandwich Manufacturing: Past, Present and Future / J. R. Virson (Ed.). Stockholm, 1999. 198 p.
3. Dutton S., Kelly D., Baker A. Composite Materials for Aircraft Structures. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Reston. Virginia, 2004. 599 p. doi: <https://doi.org/10.2514/4.861680>
4. Carbon honeycomb plastic as light-weight and durable structural material / Slyvynskiy V. I., Alyamovskiy A. I., Kondratjev A. V., Kharchenko M. E. // 63th International Astronautical Congress. 2012. Vol. 8. P. 6519–6529.
5. Гайдачук А. В., Сливинский В. И. О концепции квалиметрии и управления качеством производства сотовых наполнителей и конструкций // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2000. Вып. 22 (5). С. 56–64.
6. Wang D., Bai Z. Mechanical property of paper honeycomb structure under dynamic compression // Materials & Design. 2015. Vol. 77. P. 59–64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.037>
7. Сотовые наполнители и панельные конструкции космического назначения. Т. 2: монография / Гайдачук А. В., Гайдачук В. Е., Карпикова О. А., Кириченко В. В., Кондратьев А. В. // Совершенствование сотовых наполнителей и конструкций технологическими методами. Харьков, 2015. 247 с.

8. Ендогур А. И., Вайнберг М. В., Иерусалимский К. М. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. Москва, 1986. 200 с.
9. Wang D.-M., Wang Z.-W. Experimental investigation into the cushioning properties of honeycomb paperboard // *Packaging Technology and Science*. 2008. Vol. 21, Issue 6. P. 309–316. doi: <https://doi.org/10.1002/pts.808>
10. Интенсификация процесса изготовления сотового наполнителя из алюминиевой фольги / Крысин В. Н., Мурзинов В. А., Мартынюк А. Т. и др. // *Авиационная промышленность*. 1981. № 8. С. 9–12.
11. Берсудский В. Е., Крысин В. Н., Лесных С. М. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. Москва, 1975. 296 с.
12. Olsson K.-A. Sandwich Constructions – Design and Experience / J. R. Vinson (Eds.). Stockholm, 1999. 214 p.
13. Herrmann A. S. Design and Manufacture of Monolithic Sandwich Structures with Cellular Cores / J. R. Vinson (Ed.). Stockholm, 1999. 274 p.
14. Charon A. Hot-wet Environmental Degradation of Honeycomb Structure Representative of F/A-18: Discolouration of Cytec FM-300 Adhesive // *Technical note, DSTO-TN-0263*. Melbourne, 2000. 42 p.
15. Иванов А. А., Кашин С. М., Семенов В. И. Новое поколение сотовых наполнителей для авиационно-космической техники. Москва, 2000. 436 с.
16. Gaydachuk A. V., Slivinsky M. V., Golovanevsky V. A. Technological Defects Classification System for Sandwiched Honeycomb Composite Materials Structures // *Materials Forum*. 2006. Vol. 30. P. 96–102.
17. Зак М. И. Исследование, разработка и автоматизация процесса растяжки сотовых блоков в производстве летательных аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1980. 19 с.
18. Гайдачук В. Е., Мельников С. М. О возможности регламентации дефектов, возникающих в процессе растяжки сотопакета в сотовых блоках при производстве сотовых наполнителей // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006. № 5 (31). С. 5–10.
19. Technological possibilities for increasing quality of honeycomb cores used in aerospace engineering / Slyvyns'kyy V., Gajdachuk A., Melnikov S. M. et. al. // *58th International Astronautical Congress 2007 Hyderabad*. 2007.
20. New Possibilities of Creating Efficient Honeycomb Structures for Rockets and Spacrafts / Slivinsky M., Slivinsky V., Gajdachuk V. et. al. // *55th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law*. 2004. doi: <https://doi.org/10.2514/6.iac-04-i.3.a.10>
21. Scientific fundamentals of efficient adhesive joint in honeycomb structures for aerospace applications / Slyvyns'kyy V., Slyvyns'kyy M., Polyakov N. et. al. // *59th International Astronautical Congress 2008*. 2008.
22. Gaydachuk V., Koloskova G. Mathematical modeling of strength of honeycomb panel for packing and packaging with regard to deviations in the filler parameters // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, Issue 1 (84). P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85853>
23. Метод корректирования аналитических моделей физических процессов, явлений или свойств объектов с использованием экспериментальных данных / Гайдачук В. Е., Карпикова О. А., Кириченко В. В., Кондратьев А. В. // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2014. Вып. 65. С. 169–181.
24. Beer F. P. *Mechanics of materials*. McGraw-Hill Higher Education, 2009. 782 p.
25. Технические условия ТУ 46-21-169-83. Фольга из алюминиевого сплава марки АМг2-Н. ВПО «Союз-цветметобработка», 1987. 11 с.
26. MIL-A-81596A. Aluminum Foil for Sandwich Construction.
27. Basic parameters' optimization concept for composite nose fairings of launchers / Slyvyns'kyy V., Gajdachuk V., Kirichenko V., Kondratiev A. // *62nd International Astronautical Congress*. 2012. Vol. 9. P. 5701–5710.