

УДК 629.12:678.512.92

А.В. ГАЙДАЧУК<sup>1</sup>, Е.К. ОСТРОВСКИЙ<sup>1</sup>, М.В. СЛИВИНСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина,*

<sup>2</sup> *ОАО «УкрНИИТМ», Украина*

## НАКОПЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ПОЛИМЕРНОЙ БУМАГИ «NOMEX»

Разработана методика измерения статического заряда, которая дает возможность определить основные очаги накопления статического электричества на всей технологической линии производства сотового заполнителя. Анализ результатов измерений позволяет выделить два основных технологических участка, присутствие заряда на которых может влиять на качество изделия.

**сотовый заполнитель, полимерная бумага, электростатический заряд, полимерное связующее, авиационно-космическая техника**

Применение сотовых конструкций во многом определило успешное развитие авиационной и ракетно-космической техники, а вместе с тем дало толчок развитию технологии клееных тонкостенных конструкций с применением в качестве материала сотовых заполнителей (СЗ) стекло-, углепластиков, алюминиевой фольги и полимерной бумаги [1].

Одним из наиболее прогрессивных методов изготовления сотового заполнителя из этих материалов является метод растяжки сотоблоков [2, 3]. На качество СЗ, изготавливаемых этим методом, существенное влияние оказывают технологические факторы. Некоторые из этих факторов достаточно глубоко исследованы [4-5], анализ других пока не нашел достаточного отражения в научных публикациях.

К недостаточно исследованным факторам относятся статическая электризация материала СЗ (стеклоткани, полимерной бумаги), к проявлению которой можно отнести такие дефекты, как слипание отдельных ячеек, а также неравномерность пропитки СЗ на заключительной стадии их изготовления.

Статическая электризация охватывает огромное количество процессов, ведущих к образованию как свободных, так и связанных положительных и отрицательных электрических зарядов, возникающих в результате механических деформаций при контакте

двух твердых тел, твердого тела и жидкостей при их последующем разделении.

Статической электризации подвержены все диэлектрики, для которых удельное электрическое сопротивление  $\rho$  выше  $10^5$  Ом·м.

Используемые в авиационно-космической технике полимерные композиционные материалы в большинстве своем являются хорошими диэлектриками с высоким удельным электрическим сопротивлением  $\rho = 10^7 \dots 10^{18}$  Ом·м.

За последнее время появился ряд новых синтетических материалов с более высокими диэлектрическими свойствами и большим удельным сопротивлением, что сделало проблему борьбы со статическим электричеством чрезвычайно актуальной.

С проявлением отрицательного влияния статического электричества на проведение технологического процесса пришлось столкнуться при изготовлении СЗ из полимерной бумаги (ПБ) «NOMEX» для авиационных трехслойных конструкций в ОАО «УкрНИИТМ».

Используемая на предприятии «дольковая» технология изготовления СЗ заключается в нанесении на ПБ полос клея, их подсушке, разрезке рулонного материала с подсушенными полосами клея на заготовки, сборке заготовок в пакет, склейке пакета в прессе с обогреваемыми плитами, разрезке пакета

на «дольки», растяжке панели, пропитке и термообработке.

В ходе реализации технологического процесса изготовления СЗ были обнаружены эффекты разбрызгивания клеевого состава вблизи клеевых полос и неравномерного нанесения связующего на панель СЗ. Проявление последнего эффекта визуально выражается в наличии некоторой эллипсовидной области на поверхности сотоблока, имеющей более светлый оттенок (тонкий слой связующего) с переходом к более темному оттенку по краям области (более толстый слой связующего) [6]. Анализ этих эффектов позволяет предположить, что их причина связана с наличием статических зарядов на диэлектрике – ПБ.

Целью настоящей работы является разработка методики обнаружения электростатического заряда на поверхности ПБ, определение источников его возникновения на отдельных этапах технологического процесса, а также оценка степени влияния статического заряда на качество изготавливаемых СЗ.

Для определения наличия статического заряда на ПБ использовался метод электростатической индукции, электрическая схема которого представлена на рис. 1.

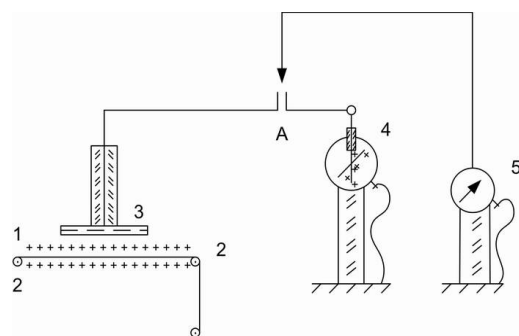


Рис. 1. Электрическая схема регистрации и определения знака заряда статического электричества:

1 – полимерная бумага; 2 – изоляторы (трубки  $Al_2O_3$ ); 3 – металлический диск; 4 – электроскоп, 5 – зеркальный гальванометр

Суть метода заключается в том, что металлический диск 3 соединен проводником с прибором 4, измеряющим электрический потенциал  $\phi$ . Таким

прибором может быть электроскоп или (для измерения более низких потенциалов) электромметр с большим сопротивлением.

Металлический диск 3 и электроскоп 4 перед измерением должны быть максимально удалены от заряженного объекта 1 и для снятия случайных зарядов заземлены. Если теперь металлический диск приблизить на малое расстояние к положительно заряженной поверхности 1, то в изолированной системе «диск – электроскоп» произойдет перераспределение свободных электронов. Электроны скопятся на поверхности диска, обращенной к положительно заряженной исследуемой поверхности 1, заряжая ее до потенциала  $-\phi$  относительно исходного потенциала земли. Противоположная сторона диска при этом будет иметь потенциал  $+\phi$ . Так как диск и электроскоп электрически соединены проводником, электроскоп будет заряжаться до потенциала  $+\phi$ , равного потенциалу обратной стороны диска, и иметь заряд  $+q$ , что и регистрируется по отклонению подвижной части электроскопа. Такое же перераспределение зарядов в замкнутой системе «диск – электроскоп» происходит и при отрицательном заряде на поверхности 1. И в том, и в другом случае знаки потенциала и заряда на электроскопе те же, что и на объекте исследования.

Знак заряда на электроскопе можно определить, если, не удаляя диск от заряженной поверхности, разомкнуть цепь в точке А и подсоединить электроскоп к нуль-гальванометру 5. Для качественных измерений использовался переносной зеркальный гальванометр типа М 195/2 с чувствительностью  $C = 4,1 \cdot 10^{-9}$  А/дел,  $R_T = 110$  Ом,  $R_K = 1500$  Ом. В процессе проведения измерений диск должен располагаться на малом расстоянии от заряженной поверхности. Экспериментально установлено, что, начиная с расстояния 4 мм, дальнейшее уменьшение заряда не приводит к изменению показаний электроскопа. Это имеет место только в том случае, когда площадь, занятая зарядом, больше площади из-

мерительного диска. В этом случае вблизи равномерно заряженной плоскости напряженность поля в вакууме  $E_0$  есть величина постоянная и связана с плотностью заряда на ПБ  $\delta_0$  равенством

$$E = \frac{\delta_0}{2\varepsilon_0},$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Так как показания электроскопа, измеряющего потенциал  $\varphi$ , пропорциональны плотности электростатических зарядов  $\delta_0$  на объекте измерений, все последующие измерения  $\varphi$  будут приведены в единицах делений электроскопа.

При проведении экспериментов по измерению статического заряда на технологической линии изготовления СЗ из ПБ «NOMEX» на опытно-экспериментальном производстве ОАО «УкрНИИТМ» на первом этапе определялись очаги возникновения зарядов статического электричества. При этом в качестве датчика использовался тонкий металлический диск диаметром  $d = 230$  мм, держатель которого выполнен из алундовой керамики с высоким удельным сопротивлением.

Второй этап измерений предусматривал выявление участков с наиболее интенсивным образованием статических зарядов в пределах очагов, определенных на первом этапе. При этом использовался малый диск диаметром  $d = 30$  мм.

Ниже анализируются результаты измерений статического заряда на участках технологической линии производства панелей с СЗ.

1. *Статический заряд на рулонах «NOMEX», поставляемых фирмой «Дюпон».* Рулоны ПБ поставляются изготовителем в герметической упаковке из полиэтиленовой пленки. Время поставки рулонов заказчиком составляет 2,5 мес.

Измерение статического заряда на рулоне ПБ со снятой защитной полиэтиленовой пленкой показало, что рулоны имеют высокий начальный уровень статического заряда. По высоте рулона  $l = 0,92$  м заряд распространен неравномерно. Максимум заряда на-

ходился на торцах рулона и достигал 6 – 6,5 делений, спадая к середине до 3 – 4,5 делений. Полиэтиленовый кулек, снятый с рулона, имел противоположный заряд в 5–6 делений. Проверка контактной пары «ПБ – полиэтиленовая пленка» подтвердили, что при касании с трением и последующим разделением этой пары появляется очаг электризации. Это объясняет причину высокого уровня электризации торцов рулона. В герметической полиэтиленовой упаковке этот заряд без контакта с атмосферным воздухом длительно, в течение нескольких месяцев, сохраняется как вблизи торца, так и в плотно скатанном рулоне.

2. *Участок разрезки рулона на две части с последующей перемоткой.* При разматывании рулона полимерной бумаги в процессе его разрезки на две половины измерялся уровень статического заряда как на исходном рулоне так и на двух его половинах после разрезки. Установлено, что дополнительным источником статического электричества на этом участке является так называемая «рогожа», разглаживающая разматывающуюся ленту бумаги перед разрезкой. После контакта с ней уровень заряда на ПБ повышается с 5 до 7-8 делений. Плотно смотанные после разрезки два рулона ПБ содержат в объеме значительный статический заряд.

Контроль уровня заряда на этих двух рулонах был проведен через две недели. Результаты эксперимента позволяют сделать вывод о том, что заряд потеряли только первых два слоя полимерной бумаги, намотанных неплотно, и торцы рулона, имеющие хороший контакт с атмосферой. Остальной объем рулона продолжал сохранять высокий уровень заряда (4,5 деления).

3. *Установка нанесения клеевых полос на полимерную бумагу (рис. 2).*

Измерения уровня статического заряда на полимерной бумаге на отдельных участках этой установки показали следующее:

1. Установленные рулоны бумаги после дли-

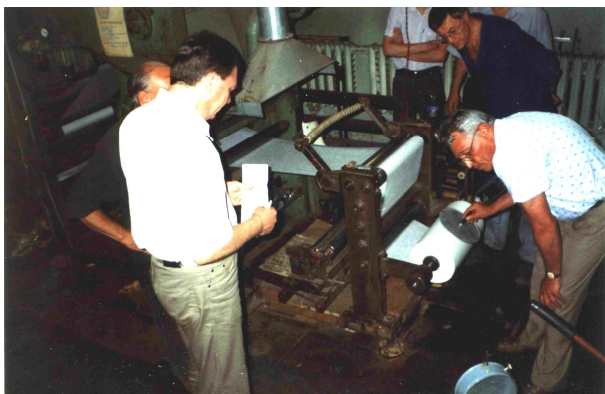


Рис. 2. Установка нанесения клеевых полос

тельного хранения имеют исходный статический заряд 3,5 – 4,5 деления, который неравномерно распределен как по ширине рулона, так и по ширине разматываемой полосы ПБ. Максимум заряда расположен в центре как рулона, так и размотанной полосы.

2. Уровень заряда 3,5 – 4,5 деления при прохождении рулона через металлические валки практически не увеличивается вплоть до подхода к клеевому барабану. В этом узле установки полимерная бумага одновременно контактирует с последующим разделением как с клеевой массой, так и с резиновым прижимным валом. Уровень заряда на выходящей поверхности полимерной бумаги после клеевого барабана превышал 10 делений. В других пробах электроскоп зашкаливало. Исследования по контакту полимерной бумаги с резиновыми валками, проведенные в НПП «НИТОМ», подтвердили, что эта контактная пара является наиболее сильным источником статического заряда, что и обнаруживается при их разделении.

Эксперименты на стенде ХАИ по нанесению капли клеевого состава на предварительно заряженную горизонтальную поверхность ПБ показали, что отрыв капли от пипетки сопровождается разрывом ее на большое число мелких капель. Этого нет при падении капли на незаряженную поверхность. Причина этого явления физически понятна и связана с поляризацией диэлектрика клеевого состава во внешнем электростатическом поле, создаваемом

статическим зарядом на ПБ. Силовое взаимодействие между зарядами на ПБ плотностью  $+\delta_0$  и поляризованными зарядами капли  $\pm\delta'$  и является причиной разрыва капли жидкости.

Результаты экспериментов по разрыву капли клеевого состава с образованием брызг дают основание предполагать, что это же явление наблюдается при разбрызгивании клеевой массы в момент разделения полимерной бумаги с пазом барабана, в котором сосредоточена клеевая масса. Источниками такого большого статического заряда на этом участке являются три причины:

а) заряд, поступающий вместе с полимерной бумагой, который был ранее сосредоточен в рулоне и имел величину 3,5 – 4,5 деления;

б) дополнительный статический заряд, появляющийся при разделении пары «полимерная бумага – резиновый прижимной вал»;

в) дополнительный заряд при разделении пары «полимерная бумага – клеевой состав».

4. *Участок разрезки полимерной бумаги с клеевыми полосами.* На этом участке на всех этапах имеет место контакт ПБ с органическим стеклом, сталью или алюминиевым сплавом. Пара «ПБ – оргстекло» способна при контакте-трении вызвать электростатический заряд, который обнаруживается при разделении этой пары. Появление на этом участке зарядов регистрируется, а также наблюдается визуально по слипанию листов бумаги при их механическом разделении в общей кипе листов.

5. *Участок растяжки сотового заполнителя.* Образование статического заряда на этом участке (рис. 3) обнаружено на всех образцах, участвовавших в эксперименте. Исходные пакеты сотового заполнителя в сжатом состоянии не обнаруживали на себе статического заряда.

На следующем этапе при растяжке пакета с образованием правильных шестигранных ячеек обнаружено их слипание по причине разбрызгивания клеевой массы при нанесении клеевых полос. В процессе



Рис. 3. Участок растяжки панели с СЗ

восстановления формы ячеек, осуществляемого вручную, происходит разделение ПБ с высохшей клеевой массой. Частичный разрыв контакта «ПБ – клей», по нашему мнению, сопровождается появлением статического заряда на панели.

Величина этого заряда на разных образцах составляла 3 – 3,5 делений. «Время жизни» заряда на поверхности панели не установлено. Снять полностью заряд активным методом с помощью медной заземленной щетки не всегда удается за одно касание. Это связано с тем, что заряд сосредоточен внутри сотовых ячеек и не доступен металлической щетке.

*б. Участок аппретирования, пропитки и сушки панелей.* Именно на этом последнем участке технологической линии изготовления СЗ обнаруживаются дефекты, связанные с неравномерным по толщине покрытием полимерной бумаги пропиточным составом на основе бакелитового лака.

Обычно дефектные участки на панели расположены хаотично. Характер дефектов состоит в том, что после погружения панели в ванну с пропитывающим раствором и стекания излишков пропиточного состава при ее извлечении из ванны на панели образуются участки неравномерной пропитки, где толщина слоя пропитки различная (рис. 4).

Подобная картина формирования тонкой пленки наблюдалась на стенде ХАИ при растекании капли пропиточного состава по заряженной поверхности ПБ, что свидетельствует об электростатической природе.

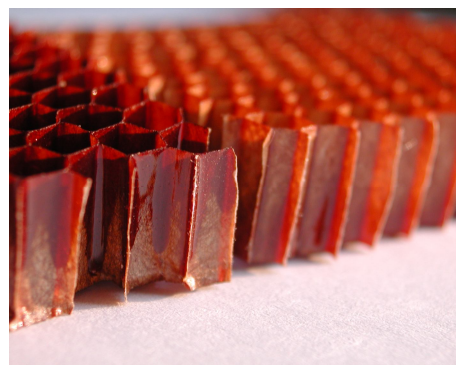


Рис. 4. Характер дефекта СЗ после пропитки

Проведенные эксперименты по измерению статического заряда на сотовом наполнителе позволяют сделать следующие заключения.

1. Поступающие на участок после растяжки панели перед операцией аппретирования имеют статический заряд, появляющийся при растяжении панели, а также при разделении ячеек в местах брызг клеевой массы. «Время жизни» этого заряда не менее суток.

2. После аппретирования и первой пропитки полностью высохшие панели статического заряда не имеют. В то же время заряд на них может возникнуть при контакте с другим диэлектриком.

Образующийся в этом случае статический заряд не всегда удается снять заземленной металлической щеткой из-за сложности формы сотового наполнителя.

Выполненные экспериментальные исследования по установлению очагов возникновения зарядов статического электричества на технологической линии производства СЗ из полимерной бумаги «NOMEX» позволяют определить круг материалов, контакт с которыми вызывает образование очагов статического электричества. Анализ полученных экспериментальных данных позволяет разработать рекомендации по нейтрализации заряда на наиболее важных участках производства СЗ, определяющие качество изделий.

## Выводы

1. В технологическом процессе изготовления СЗ на основе полимерной бумаги наблюдается нерав-

номерность пропитки панелей составом связующего на основе бакелитового лака. Одной из возможных причин такого явления может быть присутствие на поверхности полимерной бумаги электростатического заряда, возникающего при контакте ее как с другими диэлектриками, так и с металлами. Это характерно для всех диэлектриков с удельным сопротивлением  $\rho > 5 \cdot 10^5$  Ом·м.

2. Проведенные эксперименты на технологической линии ОАО «УкрНИИТМ», где производятся СЗ из ПБ, показали достаточно высокий уровень электростатического заряда на всех участках технологической линии. Этот заряд определяется не только остаточным статическим зарядом, длительно сохраняющимся внутри исходного рулона, но и дополнительной электризацией ПБ на участках технологической линии.

3. Анализ полученных экспериментальных данных позволяет выделить два основных технологических участка – нанесения клеевых полос и пропитки панелей, при этом присутствие статического заряда на ПБ способно влиять на качество изделия.

4. Экспериментально установлено, что «время жизни» статического заряда  $\tau$  на развернутой поверхности ПБ при контакте с атмосферным воздухом влажностью 70 – 80% составляет 5 – 10 часов.

«Время жизни» заряда в плотно свернутом рулоне ПБ достаточно большое (более 7 месяцев), следовательно, на клеевой барабан ПБ поступает уже в заряженном состоянии. Таким образом, необходимость применения средств нейтрализации статического электричества на этом участке является очевидной.

5. Для уменьшения статического заряда на участке нанесения клеевых полос рекомендуется использовать заземление ПБ с двух сторон скользящими металлическими щетками, эффективность которого была экспериментально доказана на стенде ХАИ.

## Литература

1. Иванов А.А., Кашин С.М., Семенов В.И. Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 436 с.
2. Сливинский В.И., Прегат В.В., Ткаченко Г.В. Сотовые заполнители: классификация, применение, расчет физико-механических характеристик. Обзор. – К.: ЦНТИ «Поиск», 1990. – 43 с.
3. Щербаков В.Т., Компанец Е.М., Разумовский В.А. Сотовые заполнители из полимерных бумаг для силовых конструкций из композиционных материалов // Технология. Межотр. науч.-техн. сб. «Конструкции из композиционных материалов». – М., 1989. – № 1. – 63 с.
4. Гайдачук А.В., Сливинский В.И., Грошевой А.И. Анализ дискретных случайных утяжек несущих слоев супертонких панелей солнечных батарей, возникающих в процессе их производства // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Темат. сб. науч. трудов ХАИ. – Х., 1998. – Вып. 10. – С. 22 – 26.
5. Гайдачук А.В., Сливинский В.И. О концепции квалитетрии и управления качеством производства сотовых заполнителей и конструкций // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Темат. сб. науч. трудов ХАИ. – Х., 2000. – Вып. 23(6). – С. 59 – 65.
6. Вамболь А.А., Сливинский М.В. Влияние статической электризации полимерной бумаги на качество сотового заполнителя на ее основе // Міжнар. наук.-техн. конф. „Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні – ІКТМ-2003”: Тези доп. – Х.: НАКУ „ХАІ”. – 2003. – С. 57.

*Поступила в редакцию 17.03.04*

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