

УДК 629.12 : 678.512.92

А.В. ГАЙДАЧУК¹, Е.К. ОСТРОВСКИЙ¹, М.В. СЛИВИНСКИЙ²

¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

² *ОАО «УкрНИИТМ», Днепропетровск, Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТЕРМООБРАБОТКИ СОТОПАНЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНОЙ БУМАГИ «NOMEX»

Экспериментально изучено распределение температуры в камере аэродинамической печи и в зоне расположения сотовых панелей в процессе цикла их высокотемпературной обработки. Показано, что на участках плотной упаковки сотовых панелей (без воздушного зазора) температура на $18 \div 20$ °С ниже, чем это предусмотрено техническими условиями на технологический процесс. Рассмотрены физические и технические причины, вызывающие снижение температуры при плотной упаковке сотовых панелей, и их влияние на качество изделий.

сотовый наполнитель, сотовая панель, полимерная бумага, аэродинамическая печь, термообработка, полимерное связующее, авиационно-космическая техника

Трехслойные панели с сотовым наполнителем (СЗ) из полимерной бумаги (ПБ) «NOMEX» находят все большее применение в авиационно-космической технике. Технология изготовления панелей с 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 под давлением обогреваемыми плитами, разрезке пакета на «дольки», растяжке панелей, пропитке в жидком растворе связующего (бофос + бакелитовый лак + этиловый спирт) с последующей подсушкой на воздухе в течение суток и окончательной их термообработкой в аэродинамической печи.

В процессе изготовления панелей с СЗ обнаружено ряд эффектов, связанных со статической электризацией ПБ на разных этапах изготовления панелей: разбрызгивание клеевой массы на этапе нанесения клеевых полос [1] и увеличение фактора растекания раствора связующего на этапе пропитки панелей.

Последнее приводит к уменьшению механической прочности сотовых конструкций с наполнителем из ПБ [2, 3]. Электризация ПБ при изготовлении

СЗ является не единственным источником дефектов, возникающих при изготовлении панелей.

Экспериментально установлено, что на последнем этапе технологической линии изготовления СЗ при их высокотемпературной сушке в аэродинамической печи появляется неравномерность окраски поверхности панелей.

Для определения причины появления неравномерной окраски поверхностей панелей СЗ было проведено экспериментальное исследование распределения температуры в объеме аэродинамической печи в процессе сушки панелей.

Технологический процесс изготовления сотового наполнителя завершается пропиткой сформированных после растяжки панелей в жидком растворе связующего и окончательной их термообработкой в аэродинамической печи.

Принцип работы аэродинамической печи состоит в нагреве ее внутреннего объема при торможении газового потока, когда кинетическая энергия упорядоченного движения молекул переходит во внутреннюю энергию газа (температуру газа). Учитывая большие скорости движения газа в нагреваемом объеме печи и вихревой характер потока, панели с

СЗ не могут быть расположены непосредственно в движущемся потоке, что может привести к их механическому повреждению. По техническим условиям для защиты панелей от механического разрушения пакет панелей размещается в закрытом прямоугольном шкафу, который устанавливается внутри объема аэродинамической печи. На рис. 1 приведена фотография открытой камеры аэродинамической печи с герметическим шкафом для установки панелей в центре. Подача горячего воздуха в объем печи осуществляется через щели в левом верхнем углу печи. При своем движении вокруг шкафа и вдоль стенок камеры печи воздух тормозится за счет сил трения, нагревая при этом внутренние стенки камеры печи и наружные стенки шкафа с панелями. Вентилятор через круглую решетку на правой стенке печи производит забор воздуха из ее объема и подает его под рубашку аэродинамической печи. Этот ускоренный поток, тормозясь в пространстве под рубашкой, нагревает внутренние стенки камеры печи и вновь выходит в объем камеры.

На первом этапе исследовалась равномерность распределения температуры в пустом шкафу для сушки панелей СЗ. Измерение температуры проводилось четырьмя платиновыми термосопротивлениями (ПТС) и одной хромель-копелевой (ХК) термопарой, расположенными в разных точках внутри шкафа и в камере печи. Несовпадение показаний датчиков температуры в разных точках пустого шкафа в диапазоне температур $20 \div 190$ С не превышало 3 С.

На следующем этапе исследовалось распределение температуры в шкафу, загруженном панелями СЗ. Схема расположения панелей внутри шкафа приведена на рис. 2. В эксперименте все панели имели одинаковую толщину – 20 мм. Как видно, большинство панелей установлено с зазором 25 мм. Лишь группа из четырех панелей 9, 10, 11, 12 установлена плотно без зазора. Такое же плотное прилегание имело место между пане-

лями 8, 18 и 17, 18. На этой же схеме позициями 1 – 5 указаны положения термодатчиков для контроля температуры. Хромель-копелевая управляющая термопара 1 располагалась внутри объема печи вне шкафа с панелями. Рядом с ней (поз. 2) установлено платиновое термосопротивление для контроля показаний управляющей термопары 1. Остальные три ПТС установлены в позициях: 3 – в середине плотного пакета из четырех панелей, между панелями 10 – 11; 4 – в свободном пространстве шкафа с панелями и 5 – в зазоре между панелями 1 – 2.

По показаниям управляющей термопары 1 осуществляется регулировка температурного режима в аэродинамической печи в процессе сушки включением и выключением двигателя вентилятора. Технологический процесс высокотемпературной обработки панелей предполагает постепенный ступенчатый подъем температуры в диапазоне от 20 С до 190 С по режиму, представленному на рис. 3.



Рис 1. Камера аэродинамической печи со шкафом внутри

Как следует из этого рисунка, режим обработки панелей СЗ состоит из восьми временных участков, которые отличаются как температурой, так и длительностью выдержки панелей при заданной температуре.

На первом временном участке I идет подъем температуры от 20 С до 85 С при постоянно работающем двигателе вентилятора. Температура в печи при этом регистрируется одновременно термопарой 1 и ПТС 2. Скорость возрастания температуры внутри аэродинамической печи определяется теплоемкостью печи и подводимой тепловой энергией. Точность измерения температуры управляющей термопарой 1 контролировалась показаниями платинового термосопротивления ПТС 2. Как видно на

графиках рис. 3 совпадение показаний термодатчиков 1 и 2 достаточно хорошее на всем участке подъеме температуры (20 ÷ 85) °С. Показания остальных термодатчиков 3 – 5, установленных внутри шкафа, на временном участке I отстают от температуры снаружи шкафа (термодатчики 1 и 2). Это связано с наличием достаточно большой теплоемкости у металлического шкафа вместе с панелями, а также с процессом испарения растворителя из пропиточного состава, понижающим температуру панелей.

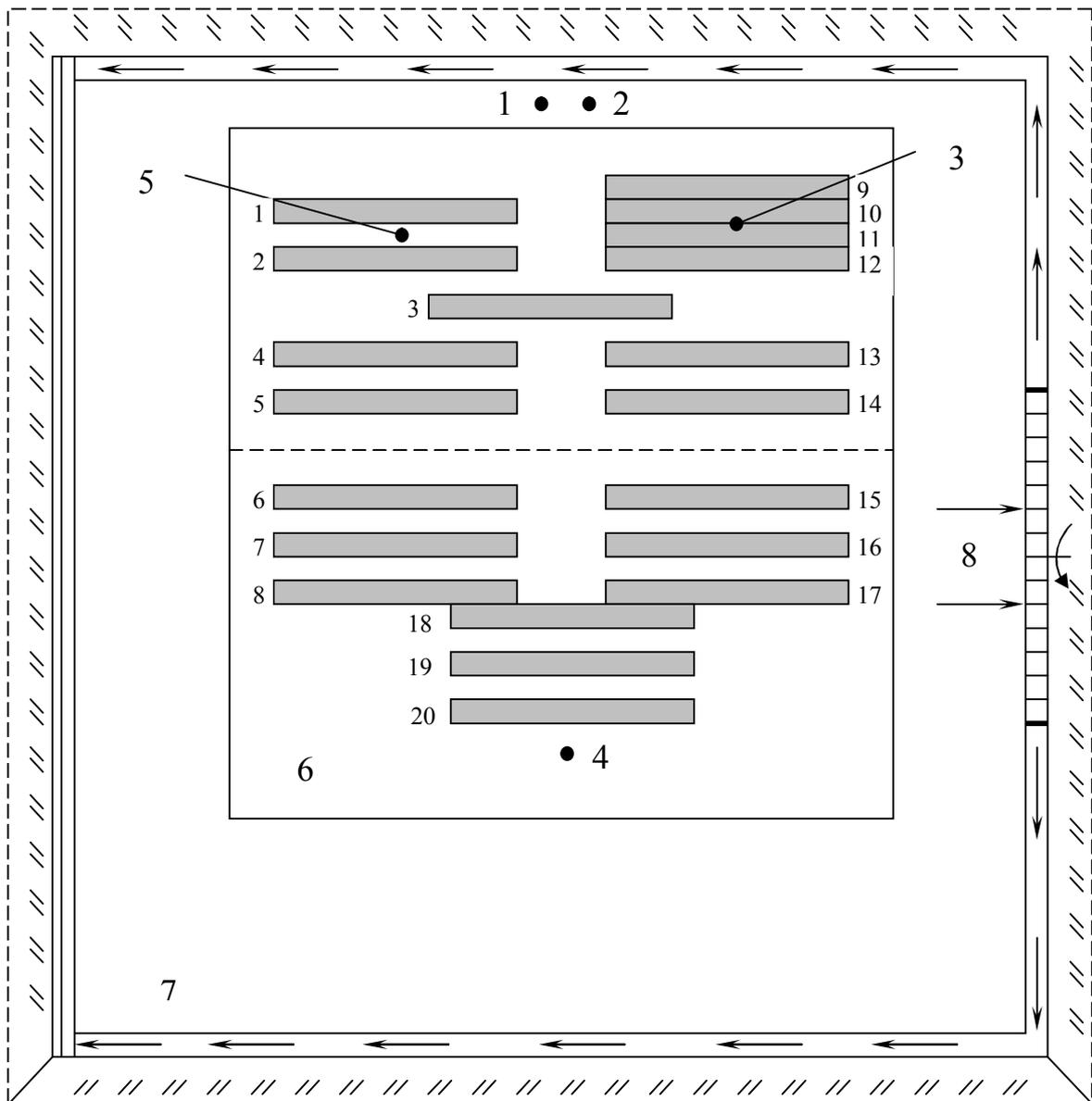


Рис. 2. Схема расположения панелей и датчиков температуры в аэродинамической печи:

- 1 – термопара ХК; 2 – платиновое термосопротивление ПТС; 3 – ПТС среди панелей с плотной упаковкой;
 4 – ПТС контроля температуры в шкафу; 5 – ПТС среди панелей, установленных с зазором 25 мм;
 6 – шкаф с панелями; 7 – камера печи; 8 – вентилятор аэродинамической печи

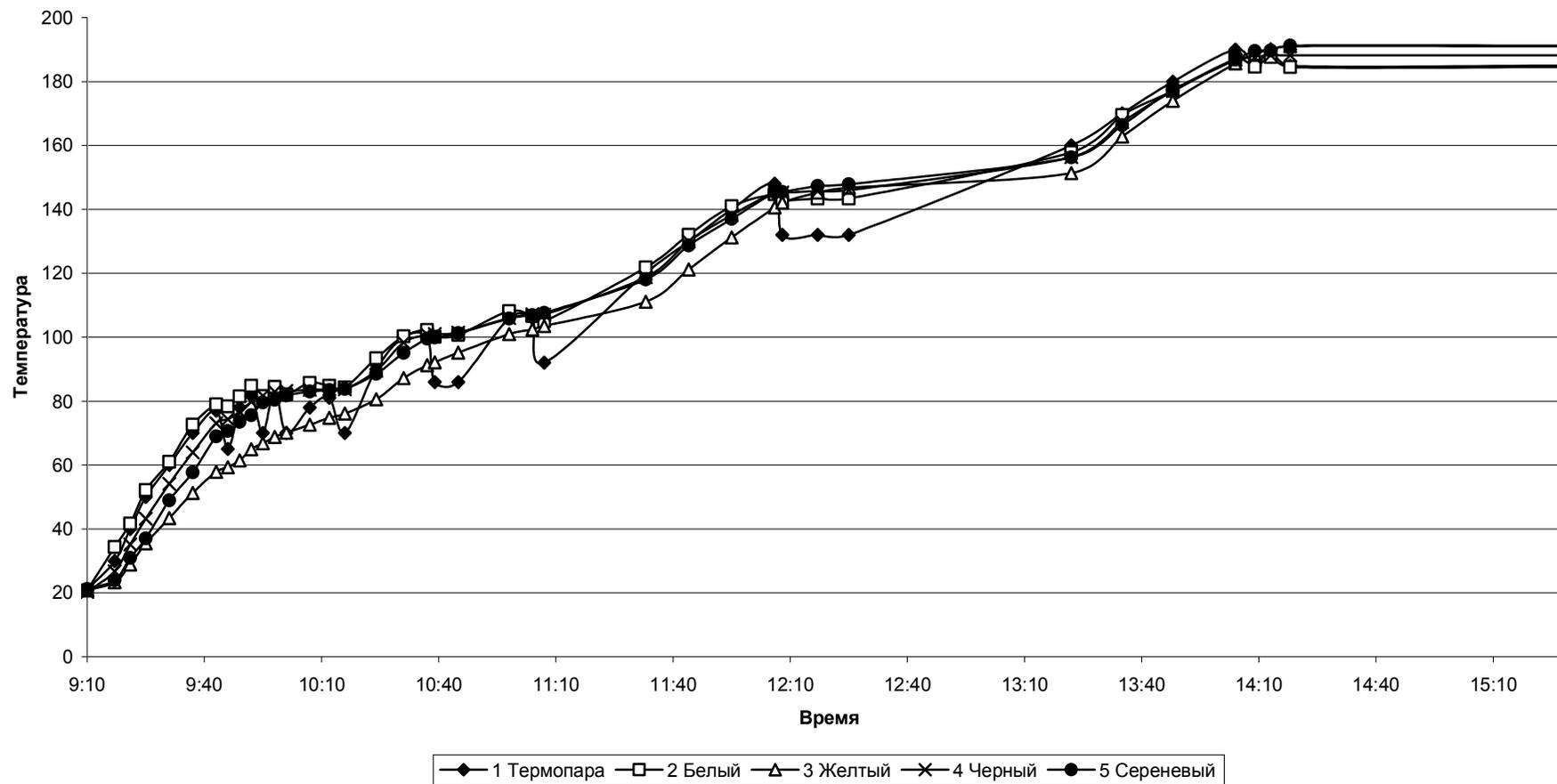


Рис. 3. Показания термодатчиков в аэродинамической печи высокотемпературной сушки панелей с СЗ:

- 1 – термопара ХК; 2 – платиновый термометр сопротивления (ПТС), установленный вне шкафа с панелями рядом с термопарой ХК;
3 – ПТС, установленный среди плотно упакованных панелей; 4 – ПТС, установленный в свободном пространстве шкафа с панелями;
5 – ПТС, установленный между редко расположенными панелями с зазором 25 мм

Обращает на себя внимание показания датчика температуры 3. Он расположен среди панелей, установленных плотно без зазора, и показывает, что температура внутри пакета панелей 9, 10, 11, 12 на 20 °С ниже на всем временном интервале I подъема температуры. Заметим, что наружные стороны сопанелей 9 и 12 при этом находятся при температуре на 20 °С выше, на что указывает термодатчик 4. Разница температур в шкафу (ПТС 4) и внутри пакета плотно упакованных сопанелей (ПТС 3) увеличивается при подъеме температуры в печи в диапазоне температур (20...85) °С соответственно на (0...20) °С. По нашему мнению это отставание температуры в точке 3 связано не только с собственной теплоемкостью металлического шкафа вместе с сопанелями, но и с процессом испарения растворителя из пропиточного состава, которое увеличивается по мере повышения температуры внутри шкафа.

Рассмотрим далее изменение температуры на временном интервале II в контролируемых точках внутри шкафа и вне его. Согласно техническим условиям на технологический процесс высокотемпературной обработки сопанелей в интервале времени II температура выдерживается постоянной на уровне 85 °С в течение 0,5 часа. Как видно, показания термодатчиков 1 – 5 на участке II отличаются незначительно. В это же время температура внутри плотного пакета панелей (термодатчик 3) продолжает увеличиваться, но уже с меньшей скоростью. Разность температур в конце интервала II составляет 10 °С, что связано с продолжающимся охлаждением панелей при испарении растворителя из состава пропитки. Отметим, что процесс испарения уже к концу интервала II уменьшается, а разность между температурой в шкафу (термодатчик 4) и внутри плотной группы панелей (термодатчик 3) снижается до 10 °С. Заметим, что скачки показаний температуры управляющей термопары 1 соответствуют моментам выключения двигателя вентилятора. Так как термопара 1 выполнена из тонкого провода и не

имеет керамического защитного чехла, ее теплоемкость мала, а показания в точности соответствуют изменению температуры воздуха в аэродинамической печи вне шкафа. На временном интервале III происходит второй подъем температуры с 85 °С до 110 °С. При увеличении температуры в печи показания термопары 1, ПТС 2, ПТС 4 и ПТС 5 совпадают. Температура внутри плотного пакета сопанелей, как и на участке I, отстает от температуры воздуха в шкафу как из-за наличия собственной теплоемкости панелей 9 – 12, так и за счет продолжающегося испарения растворителя из пропиточного состава.

На IV временном интервале за счет выключения двигателя вентилятора температура поддерживается на уровне 105 °С. Разница между температурой воздуха в шкафу (ПТС 4, ПТС 5) и показаниями ПТС 3 к концу этого интервала сокращается до минимального значения 5 °С. Это указывает на то, что процесс испарения к концу временного интервала IV замедляется.

На V временном интервале происходит увеличение температуры в печи от 105 °С до 150 °С при непрерывной работе двигателя вентилятора. Показания термодатчиков в печи (ХК 1, ПТС 2, ПТС 4 и ПТС 5) совпадают за исключением показаний ПТС 3, установленного среди плотного пакета сопанелей. Наблюдаемая разность температур не превышает 10 °С и вызвана как наличием собственной теплоемкости плотного пакета сопанелей, так и испарением растворителя из пропиточного состава, но уже в меньшей степени, чем на участках I и II.

На VI интервале, где температура поддерживается постоянной вблизи $t = 150$ °С, показания термодатчиков в шкафу (ПТС-3, ПТС-4, ПТС-5) отличаются между собой менее, чем на 5 °С. Это указывает на то, что процесс испарения растворителя с поверхности панелей подходит к концу.

VII временной интервал отображает последний подъем температуры со 150°С до 190°С. На этом участке, из-за наличия большой теплоемкости блока

плотно установленных панелей, рост температуры внутри блока панелей (термодатчик ПТС-3) запаздывает, как и на всех предыдущих участках подъема температуры. Характер изменения температуры позволяет сделать заключение, что процесс испарения завершается к концу VI интервала, на что указывает совпадение показаний всех термодатчиков, расположенных в шкафу с панелями.

Рассмотрим корреляцию между температурным режимом высокотемпературной обработки сотовых панелей в аэродинамической печи и цветом панелей как одного из показателей качества изделия. Исходные сотовые панели, прошедшие пропитку в жидком растворе и установленные в шкафу аэродинамической печи, имеют светло-розовый цвет до термообработки, как это видно на фотографии рис. 4.



Рис. 4. Окраска сотовых панелей до высокотемпературной обработки

После высокотемпературной термообработки наружные стороны панелей (поз. 1, 9 и поз. 8, 17, 20), обращенные к внутренним нагретым стенкам шкафа, приобретают ровный коричневый цвет, который и должны иметь сотовые панели по техническим условиям (рис. 5, а и б). На рис. 5, б цвет верхних частей панелей искажен вспышкой света при фотографировании.

Такой же ровный коричневый цвет имеют и все стороны панелей, которые установлены в шкафу с зазором 25 мм между собой (рис. 6, а).

Такая установка обеспечивает достаточный доступ к ним горячего воздуха от нагретых стенок шкафа, на что указывает совпадение температуры у термодатчиков 4 и 5 (см. рис. 3).

Основным источником дефектов, как показал анализ, является плотная упаковка сотовых панелей при

установке их в шкафу поз. 9 – 12 и поз. 8, 17, 18 (см. рис. 2). На рис. 6, б представлен один из видов дефектов на панелях 10 и 11 внутри сотового блока поз. 9 – 12, возникающий из-за плотной упаковки сотовых панелей. Отсутствие интенсивного теплообмена в плотном блоке и интенсивное испарение растворителя с панелей 9, 10, 11, 12 приводит к понижению температуры на внутренних панелях 10 и 11 (см. показание ПТС-3 на рис. 3). Как следствие снижения температуры окончательная окраска панелей неравномерная со светло-желтыми и светло-коричневыми пятнами как на одной, так и на другой стороне панелей 10 и 11.

Наиболее наглядное представление о влиянии плотной установки сотовых панелей в шкафу на уменьшение теплообмена при высокотемпературной обработке дает фотография панели 18 сделанная

со стороны контакта ее с панелями 8 и 17, когда панели 8 и 17 сняты после термообработки.

Как видно на фотографии рис. 6, в края панели 18, которые были частично прикрыты панелями 8 и

17, более светлые. В то же время неприкрытый центр панели 18 имеет темно-коричневый цвет, соответствующий техническим требованиям к изделию.

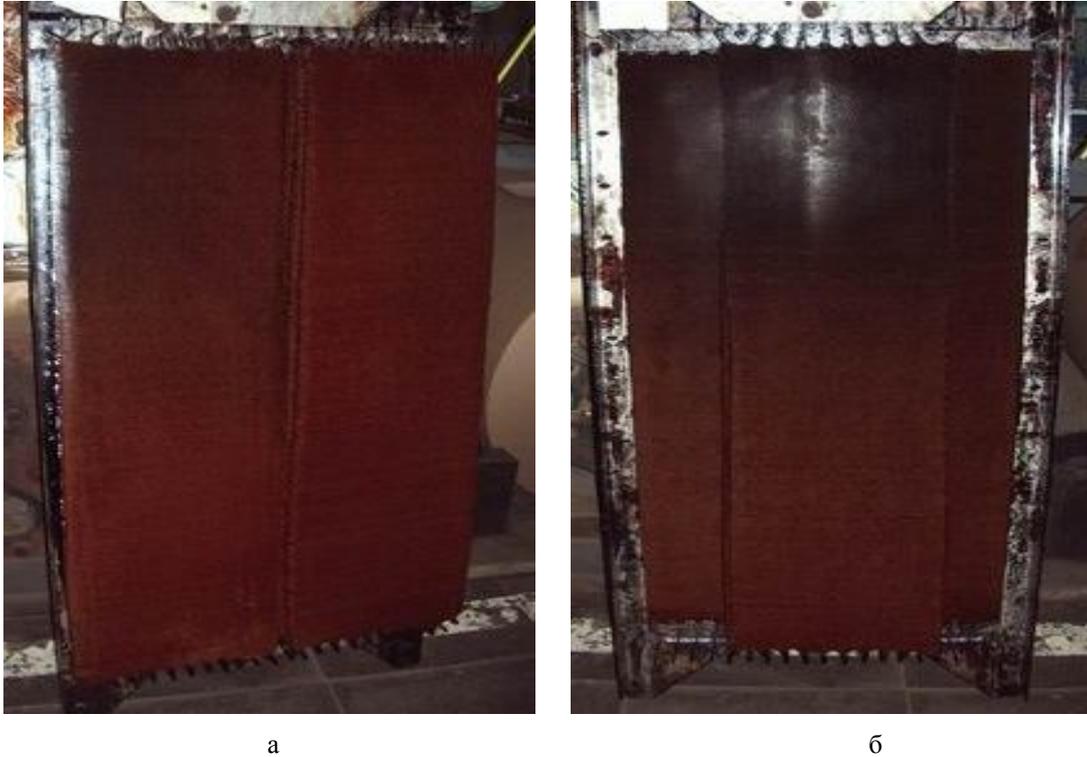


Рис. 5. Окраска наружных сторон панелей после высокотемпературной обработки:
а – панели 1 и 9; б – панели 8, 17, 20

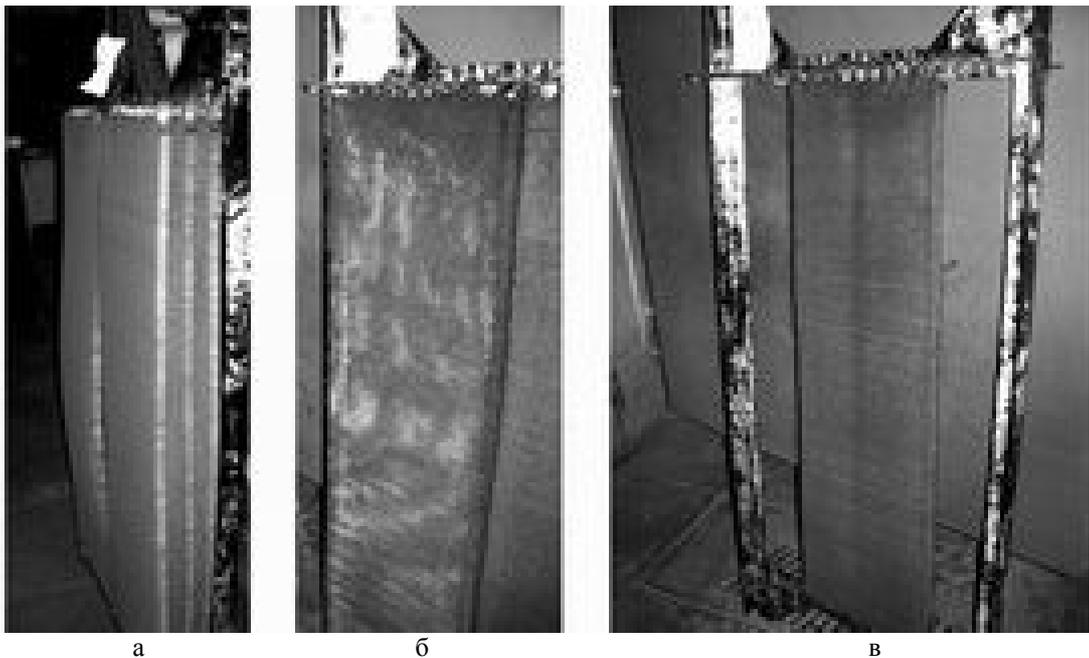


Рис. 6. Характер дефектов на сотопанелях:
а – сотопанели поз.18, 19, 20; б – сотопанели поз.10, 11; в – сотопанель поз.18

Исследование температурного поля газового потока в аэродинамической печи в процессе высокотемпературной обработки сотопанелей, а также дефектов, проявляющихся в изменении цвета слоя пропитки, позволит в дальнейшем выработать рекомендации по совершенствованию технологии изготовления сотового наполнителя из полимерной бумаги.

Выводы

1. Исследован режим высокотемпературной обработки сотопанелей из полимерной бумаги «NOMEX» в аэродинамической печи.
 2. Обнаружено существенное (на 20 °С) отставание температуры в местах плотной установки сотопанелей.
 3. Показано, что ослабление интенсивности тепломассопереноса, возникающее при плотной установке сотопанелей, приводит к неполному завершению высокотемпературной обработки и, как следствие, к появлению дефектов в окраске панелей.
 4. Для выравнивания тепломассопереноса внутри шкафа с сотопанелями рекомендуется устанавливать их с зазором не меньше 25 мм.
- Рекомендуется для интенсификации удаления продуктов испарения пропиточного состава провести

реконструкцию шкафа, увеличив как приток горячего воздуха из камеры в шкаф с панелями, так и его удаление.

Литература

1. Гайдачук А.В., Островский Е.К., Сливинский М.В. Накопление электростатического заряда при производстве сотового наполнителя из полимерной бумаги «NOMEX» // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2004. – № 2 (10). – С. 43 – 48.
2. Гайдачук А.В., Сливинский М.В., Островский Е.К., Таран А.А. Электрическое поле заряженного кольца // *Системи обробки інформації*. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вип. 5. – С. 42 – 48.
3. Гайдачук А.В., Сливинский М.В., Островский Е.К., Таран А.А. Математическое моделирование электростатических процессов на границе поляризованного диэлектрика // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2004. – Вып. 37 (2). – С. 7 – 16.

Поступила в редакцию 1.06.2005

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