

опилок тщательно утилизируют в качестве вторичного сырья (металлического лома), то в новом техническом решении, минимизируя отходы конструкционного материала (оцинкованной стали) и уменьшая дополнительные затраты, одним зигзагообразным резом можно получить зубчатые продольные кромки сразу двух листовых заготовок для гнутозамкнутых профилей. При этом универсальность их технического решения в случае необходимости позволяет, имея оптимизированное по критерию равноустойчивости сечение и отталкиваясь от него, как от базового, по заданным проектом параметрам подбирать производные сечения за один-два шага. Ряд приведенных профилей дополнен аналогичными профилями круглых очертаний, а так же составных сечений швеллерной, зетовой и двутавровой формы. Приняты в разработку, включая разные стадии патентной экспертизы, профили с перфорированными стенками (вертикальными гранями) и перфорированными полками (горизонтальными гранями). Представляется, что в дальнейшем аналогично и созвучно гнутосварным профилям (ГСП) предлагаемые гнутозамкнутые профили можно сокращенно маркировать ГЗП.

Список литература

1. *Марутян А.С.* Гнутозамкнутый профиль. Патент на изобретение № 2641333 РФ. Кл. МПК E04C3/07.17.01.2017.
2. *Кузнецов И.Л., Фахрутдинов А.Ф., Рамазанов Р.Р.* Результаты экспериментальных исследований работы соединений тонкостенных элементов на сдвиг // Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 34–43.
3. *Марутян А.С.* Гнутозамкнутые профили и расчет их оптимальных параметров // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 1. С. 33–43.
4. *Копытов М.М., Матвеев А.В.* Легкие металлоконструкции из пятигранных труб. Томск: STT, 2007. 124 с.
5. *Марутян А.С.* Профильные трубы новых модификаций для строительных металлоконструкций, включая модули «Пятигорск» и «Новокисловодск». Пятигорск: СКФУ, 2016. 168 с.

УДК 677.074.166.7:677.027.162

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННЫХ СЛОИСТЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ RESEARCH OF THE DRYING AND HEAT TREATMENT PROCESS OF COMBINED LAYERED TEXTILE MATERIALS

**Ясинская Наталия Н., Скобова Наталия В., Ольшанский Валерий И.,
Коган Александр Григорьевич
Yasinskaya Natalia N., Skoblova Natalia V., Olshansky Valery I.,
Kogan Alexander Grigorievich**

*Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь,
Vitebsk state technology university, Belarus
(yasinskaynn@rambler.ru, skobova-nv@mail.ru, olshanskiy.valera@mail.ru,
kogan-ag@rambler.ru)*

Аннотация: Проведены исследования кинетики процесса сушки слоистых материалов, полученных клеевым способом с использованием текстильных структур из натуральных и химических волокон. Разработана методика расчета продолжительности процесса сушки слоистых текстильных материалов.

Abstract: The kinetics of the drying process of layered materials obtained by the adhesive method using textile structures from natural and chemical fibers were studied. A method for calculating the duration of the drying process of layered textile materials has been developed.

Ключевые слова: слоистый текстильный материал, кинетика сушки, теплофизические свойства

Keywords: laminated textile material, drying kinetics, thermophysical properties

Сушка и термообработка - обязательные операции при формировании слоистых текстильных материалов, являются весьма продолжительными и энергоемкими, в которых расходуется большое количество тепловой энергии для испарения влаги и термофиксации полимерного связующего [1]. Продолжительность и температура процесса сушки и термообработки слоистых текстильных материалов должны строго соблюдаться во избежание высокой влажности готового материала или чрезмерной пересушки, нежелательного растрескивания, подплавления волокнистого компонента слоистого материала или разрушения слоев.

В настоящее время основными способами сушки и термообработки текстильных материалов являются конвективный, радиационный контактный и комбинированный [2]. Наиболее простым и распространенным является конвективный способ, что объясняется простотой и дешевизной используемого оборудования. Использование контактного способа при формировании слоистых текстильных материалов ограничивается их толщиной, природой волокон и полимерных связующих.

В случае материалов, имеющих значительную толщину, необходимо увеличивать время контакта поверхностного слоя с нагреваемой поверхностью, что приводит к ухудшению их качества. Контактный способ нагрева находит применение при формировании структурных эффектов (тиснения) на поверхности материала в процессе каландрирования.

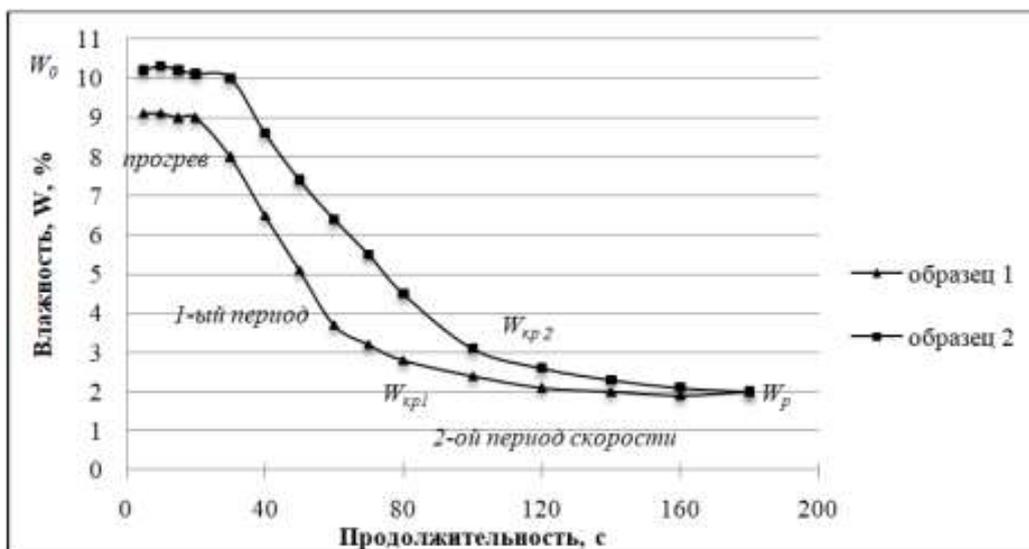
Текстильные материалы из натуральных и химических волокон чувствительны к действию высоких температур, при которых возможно протекание термодеструкционных процессов и разрушение волокнообразующего полимера. Внешним проявлением этих процессов являются усадка, повышенная жесткость и блеск, изменение окраски, нарушение структуры, расслаивание.

Таким образом, при формировании слоистых текстильных материалов к режимам процесса сушки и термообработки предъявляются следующие требования:

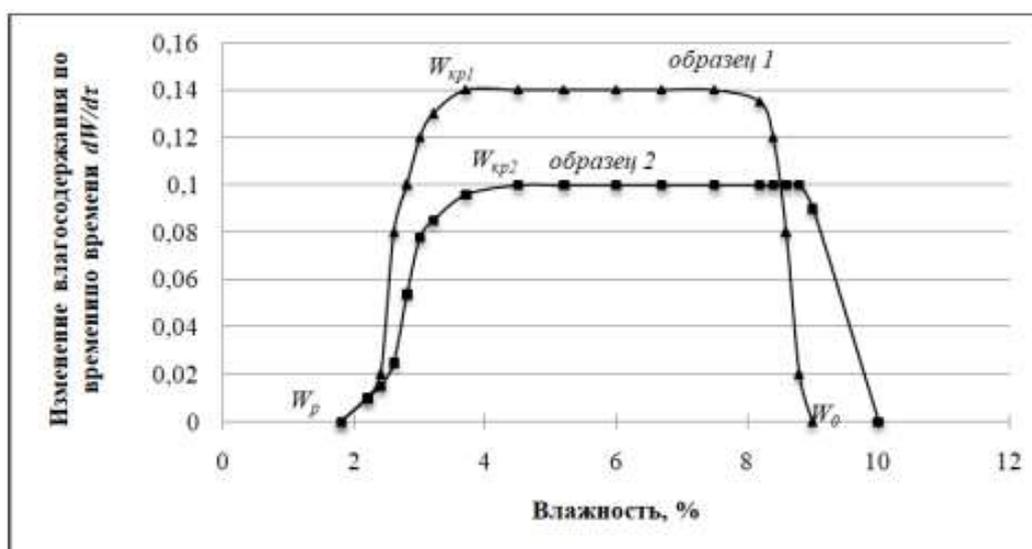
- температура теплоносителя должна быть ниже температуры, при которой протекают термодеструкционные процессы в волокнистых материалах и полимерных связующих;
- равномерное прогревание слоев, исключение «теплового удара», что способствует диффузии полимерного связующего в поры волокнистого материала и предотвращает его усадку;

Для исследования процесса сушки слоистых материалов, полученных клеевым способом с использованием текстильных структур из натуральных и химических волокон применим теорию сушки А.В. Лыкова [3, 4].

В результате экспериментальных исследований процесса конвективной сушки при температуре 140⁰С были построены кривые сушки $W=f(\tau)$ (рисунок 1, а) и скорости сушки $\frac{dW}{d\tau} = f(W)$ (рисунок 1, б), а также проведено сравнение экспериментально полученных значений режимных параметров сушки с рассчитанными с использованием приближенного метода, основанного на замене реальной кривой скорости сушки ее упрощенной идеализированной моделью (таблица 1).



а)



б)

образец 1 – слоистый ворсовой материал (нетканое полотно флизелин – нитроновый ворс 140 г/м²);
образец 2 – слоистый текстильный материал (нетканое полотно флизелин – льняная ткань 280 г/м²).

**Рисунок 1 - Кинетика сушки слоистых текстильных материалов
(формирование клеевым способом)**

Таблица 1- Расчетные и экспериментальные данные сушки слоистых текстильных материалов

Параметр	Обозначение	Единица измерения	образец 1		образец 2	
			расч.	эксп.	расч.	эксп.
Начальное влагосодержание	W ₀	%	-	9,2	-	10,3
Критическое влагосодержание	W _{кр}	%	-	3,7	-	4,5
Критическое приведенное влагосодержание	W _{кр.п.}	%	3,5	-	3,8	-
Конечное влагосодержание	W _к	%	-	3,0		
Равновесное влагосодержание	W _р	%	-	1,8	-	2,0
Относительный коэффициент сушки	χ	1/%	0,19	-	0,17	-
Постоянный коэффициент сушки	K	с-1	0,027	-	0,017	-

Продолжительность периода прогрева	τ_0	с	-	21,0	-	25,0
Продолжительность в периоде постоянной скорости	τ_1	с	39,3	40,0	58,0	60,0
Продолжительность в периоде падающей скорости сушки	τ_2	с	30,5	32,0	63,1	64,0
Продолжительность сушки	τ_{1-2}	с	69,8	93,0	121,3	149,0
Скорость сушки в периоде постоянной скорости	N	%/с	0,1421	0,14	0,1	0,1

Анализируя полученные теоретические и экспериментальные результаты можно сделать следующие выводы:

- уменьшение влагосодержания слоистых текстильных материалов (образец 1, 2) начинается при $\tau = 20-40$ с, т.е. наблюдается период прогрева (τ_0) до температуры начала испарения влаги, содержащейся в полимерном связующем;

- для слоистых текстильных материалов (образец 1, 2), полученных клеевым способом, продолжительность сушки в периоде постоянной скорости сопоставима с продолжительностью в периоде падающей скорости сушки, что можно объяснить малым начальным влагосодержанием и небольшим количеством связанной влаги в материале;

Известно [4, 5], что для тонких материалов, к которым относится большинство текстильных, при расчете общей продолжительности сушки продолжительностью периода прогрева можно пренебречь. Сравнение экспериментальных и расчетных значений показало, что для комбинированных слоистых текстильных материалов продолжительность периода прогрева значительна. Поэтому, для инженерных расчетов продолжительности термообработки слоистых текстильных материалов воспользуемся приближенным решением задачи нестационарной теплопроводности многослойной пластины [6, 7].

С этой целью слоистый текстильный материал, состоящий из двух плотно прилегающих друг к другу различных по свойствам компонентов, преобразован в эквивалентный однослойный и проанализирован процесс нагревания на основе общих законов теплопередачи. Для решения задачи использован аппарат классической теории теплопроводности А.В. Лыкова [6]. В результате получена удобная для практических расчетов формула:

$$t(0, \tau) = t_0 + 1,27(t_g - t_0) \cdot e^{-1,57 \frac{a_{экв} \tau}{R^2}} \quad (1)$$

где $t(0, \tau)$ – температура в центре слоистого текстильного материала в момент времени τ , °С;

t_g – температура воздуха в термокамере, °С;

t_0 – исходная температура материала, °С;

$a_{экв}$ – коэффициент эквивалентной температуропроводности, м²/с;

R – ½ толщины слоистого текстильного материала, м;

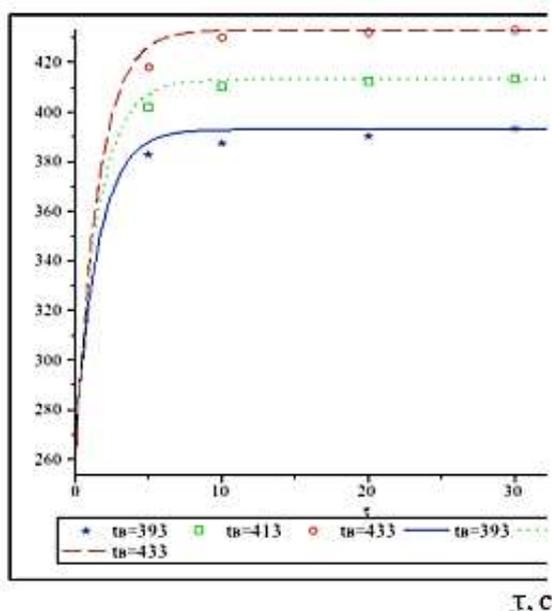
τ – продолжительность термообработки, с.

Уравнение (1) позволяет для слоистых текстильных материалов различного сырьевого состава и толщины рассчитать [8]:

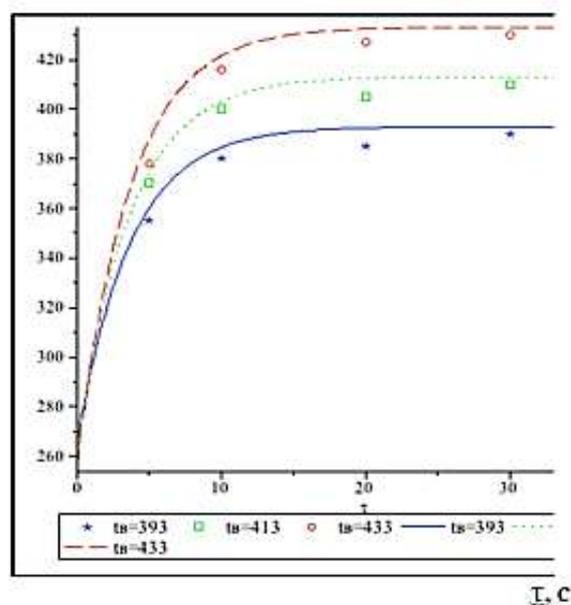
- продолжительность периода прогрева при заданной температуре в сушильной камере;

- температуру в секциях сушильной камеры, необходимую для полного прогрева слоистого текстильного материала в течении заданного времени.

Экспериментальные и расчетные исследования кинетики нагрева слоистых текстильных материалов представлены на рисунке 2. Исследования процесса прогрева проведены на предварительно высушенных образцах с целью исключения влияния испаряющейся влаги на распределение температуры.



а)



б)

*(линиями обозначены расчетные значения, точками – экспериментальные)

Рисунок 2 - Кинетика прогрева слоистого ворсового материала 140 г/м² (а) и с тканым покрытием 280 г/м² (б)

Результаты анализа экспериментальных и расчетных данных позволили предложить следующую методику расчета продолжительности процесса сушки слоистых текстильных материалов:

1. Задается температура воздуха в сушильной камере $t_в$.
 2. Задается начальная W_0 , равновесная W_p , критическая $W_{кр.п.}$ и критическая приведенная влажность материала, скорость сушки в периоде постоянной скорости сушки N .

3. Задаются геометрические и теплофизические свойства слоев текстильного композита:

- δ_1 – толщина материала основы, м;
- δ_2 – толщина текстильного покрытия, м;
- P – пористость текстильного материала, %;
- ω_1 – доля материала основы;
- ω_2 – доля текстильного материала;
- λ_1 – теплопроводность материала основы, Вт/(м·град);
- $\lambda_в$ – теплопроводность волокна, Вт/(м·град);
- c_1 – теплоемкость материала основы, Дж/ кг·град);
- c_2 – теплоемкость материала основы, Дж/ кг·град);
- γ_1 – объемная плотность материала основы, кг/м³;
- γ_2 – объемная плотность текстильного покрытия, кг/м³.

4. Расчет теплопроводности текстильного материала с учетом его пористости по формуле:

$$\lambda = 0,0259 \cdot \left[1 + \frac{(1 - P)}{\frac{P}{4} + \frac{0,0259}{\lambda_в - 0,0259}} \right]$$

5. Преобразование двухслойного материала в однослойный:

- расчет эквивалентного коэффициента теплопроводности

$$\lambda_{экв} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}$$

- расчет теплоемкости

$$c = \omega_1 c_1 + \omega_2 c_2$$

- расчет объемной плотности

$$\gamma = \frac{\omega_1 \gamma_1 + \omega_2 \gamma_2}{2}$$

- расчет толщины

$$R = \delta_1 + \delta_2$$

- расчет коэффициента температуропроводности для преобразованного в однослойный слоистого материала

$$a = \frac{\lambda_{экв}}{c \cdot \gamma}$$

6. Расчет продолжительности периода прогревания слоистого текстильного материала по формуле:

$$t(0, \tau) = t_0 + 1,27(t_g - t_0) \cdot e^{-1,57 \frac{a\tau_0}{R^2}}$$

$$\tau_0 = \frac{-R^2}{1,57a} \ln \left(\frac{t - t_0}{1,27(t_g - t_0)} \right)$$

7. Расчет относительного коэффициента сушки

$$\chi = \frac{1,8}{W_0}$$

8. Расчет суммарной продолжительности первого (постоянной скорости) и второго (падающей скорости) периодов сушки

$$\tau_{1-2} = \frac{1}{N} \left[W_0 - W_{кр.п.} + \frac{1}{\chi} \ln \frac{W_{кр.п.} - W_p}{W_{кр} - W_p} \right]$$

9. Расчет общей продолжительности сушки

$$\tau = \tau_0 + \tau_{1-2}$$

Список литературы

1. Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И., Коган А.Г. Композиционные текстильные материалы: монография. Витебск: УО «ВГТУ», 2016 299 с.
2. Гусаров А.М., Кузнецов А.А. Оценка и прогнозирование теплозащитных свойств пакетов материалов для специальной защитной одежды пожарных: монография Витебск: УО «ВГТУ», 2017. 174 с.
3. Лыков А.В. Тепло и массообмен в процессах сушки. М.: Госэнергоиздат, 1956. 518 с.
4. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Госэнергоиздат, 1950. 420 с.
5. Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И., Коган А.Г. Нестационарная теплопроводность текстильных материалов: монография. Витебск : УО «ВГТУ», 2003. 171 с.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа, 1967. 600 с.
7. Акулич П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск: Беларус. навука, 2010. 443 с.
8. Karpenya A.M., Yasinskaya N.N., Verbitskaya Y.P., Olshanskii V.I. Study of heating process for producing pliant synthetic fibre boards utilizing short-fibred wastes of natural and chemical fibre treatment // Fibre Chemistry. 2013. T. 44. № 5. P. 307–310.