

УДК [677.022:677.027.653]:537.218

**РАСЧЕТ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ФЛОКА В АДГЕЗИВЕ
ПРИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИИ**

**CALCULATION OF FLOCK FIBER EMBEDDING IN AN ADHESIVE
IN THE PROCESS OF ELECTRIC FLOCKING**

З.Р. СЦЕПУРЖИНСКАЯ, К.Э. РАЗУМЕЕВ
Z.R. STSEPURZHINSKAYA, K.E. RAZUMEEV

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)
(Moscow State Textile University "A.N. Kosygin")
E-mail: office@msta.ac.ru

На основе силового взаимодействия поступательно движущегося заряженного волокна флока с электростатическим полем разработан метод расчета, позволяющий теоретически обосновать физико-технологические параметры электрофлокирования: межэлектродное расстояние, максимальный заряд волокна, скорость его установившегося движения, а также величину заглубления флока в адгезиве. Результаты исследования могут использоваться при проектировании технологии электрофлокирования, флокаторов и при прогнозировании свойств получаемых флокированных материалов.

On the basis of power interaction of forward moving charged fiber of flock with electrostatic field the calculation method allowing to prove theoretically physical and technological parameters of electric flocking: interelectrode distance, a maximum charge of a fiber, speed of its steady movement, as well as the size of flock fiber embedding in an adhesive, has been developed. The research results can be used in designing of electric flocking technology, devices for flocking and forecasting the properties of the received flocking materials.

Ключевые слова: электрофлокирование, электростатическое поле, напряженность, заряд волокна, взаимодействие волокна и поля, скорость волокна, аэродинамическое сопротивление, лобовое сопротивление, заглубление волокна.

Keywords: electric flocking, an electrostatic field, intensity, a fiber charge, fiber and field interaction, fiber speed, aerodynamic resistance, front resistance, fiber embedding.

Теоретические исследования в области силового взаимодействия движущегося заряженного волокна с электростатическим полем [1...3] позволяют оценить предельные возможности процесса электрофлокирования и могут служить основой инженерных расчетов при проектировании технологии и флокаторов. Однако отсутствует метод расчета физико-технологических параметров флокирования с выходом на конечный показатель – величину заглубления флока в адгезиве, которая непосредственно влияет на прочность закрепления ворса и соответственно определяет износостойкость флокированных материалов.

Цель данного исследования – на основе комплексного силового анализа теоретически обосновать технические и технологические решения процесса электрофлокирования: межэлектродное расстояние, максимальный заряд флока и скорость его установившегося движения, напряженность электростатического поля, величину заглубления флока в адгезиве, размеры флокатора.

Расчет физико-технологических параметров процесса электрофлокирования проведен для полиамидного флока линейной плотности 0,33 текс со средней длиной $l_\phi = 1$ мм и диаметром $d_\phi = 0,019$ мм, который используется при выработке флокированной нити линейной плотности 270 текс на экспериментальной установке [4].

Силовое воздействие электростатического поля на волокно определяется величиной его напряженности и величиной заряда волокна. Напряженность поля не может превышать величину порядка 10 Кв/см из-за возможного пробоя воздушного промежутка [1], поэтому знание величины максимально возможного заряда волокна представляет особый интерес.

Аппроксимируем цилиндрическое волокно сферой, одинаковой с волокном плотностью и скоростью движения в воздухе, с эквивалентным радиусом, равным [3]:

$$r_3 = \sqrt[3]{ab^2} = 3,56 \cdot 10^{-5} \text{ (м)}, \quad (1)$$

где a – полудлина $l_\phi/2$ и b – полутолщина $d_\phi/2$ волокна флока.

Максимально возможный заряд волокна флока при контактной зарядке на плоском электроде q_{\max} , при расположении его параллельно силовым линиям электростатического поля с напряженностью E (В/м), рассчитываем по формуле, приведенной в [1]:

$$q_{\max} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 r_3^2 E = 4,36 \cdot 10^{-13} \text{ (Кл)}, \quad (2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость полиамидного флока, равная 4,5 при температуре воздуха 20°C и относительной влажности 65% [5]; ϵ_0 – электрическая постоянная, равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м [5]; r_3 – эквивалентный радиус, равный $3,56 \cdot 10^{-5}$ м, рассчитан по формуле (1); E – напряженность электрического поля, равная $7 \cdot 10^5$ В/м.

По данным [2] величины зарядов большинства волокон находятся в пределах $10^{-13} \dots 10^{-12}$ Кл. Таким образом, величина расчетного максимального заряда волокна хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными при непосредственном его измерении для аналогичного по геометрическим размерам и материалу волокна флока при близкой к расчетной напряженности электрического поля [3], [6].

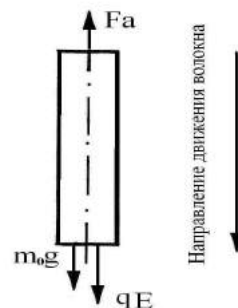


Рис. 1

Если заряженное волокно движется в однородном электростатическом поле со скоростью v (м/с), силовые линии которого вертикальны, а Кулонова сила, действующая на волокно, совпадает с направлением его движения (то есть волокно полностью ориентировано вдоль силовых линий) и направлена вниз (рис. 1), то его поступательное движение определяется суммой основных сил $\sum F$, действующих на волокно [2]:

$$\sum F = F_3 + F_T - F_a, \quad (3)$$

а уравнение поступательного перемещения его центра масс имеет вид [2]:

$$m_0 \frac{dv}{dt} = q_{\max} E + m_0 g - F_a(v). \quad (4)$$

Силу F_3 электрического взаимодействия волокна, несущего заряд q_{\max} (Кл), с полем напряженностью E (В/м) рассчитываем по формуле:

$$F_3 = q_{\max} E = 4,36 \cdot 10^{-13} \cdot 7 \cdot 10^5 = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ (Н)}. \quad (5)$$

Силу F_T тяжести волокна массой m_0 (кг) при движении волокна сверху вниз рассчитываем по формуле:

$$F_T = m_0 g = 0,323 \cdot 10^{-9} \cdot 9,81 = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ (Н)}, \quad (6)$$

где m_0 – масса одного волокна флюка, равная $0,323 \cdot 10^{-9}$ кг [4]; g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$ [5].

Силу F_a аэродинамического сопротивления рассчитываем по эмпирической формуле, полученной С. Андерсоном и Р. Стьюбсом [7] при продольном обтекании волокон диаметром $d = 20 \dots 50$ мкм воздухом со скоростью $v = 3 \dots 17$ м/с в случае, когда волокно имеет максимальную ориентацию (лобовое сечение равно нормальному):

$$F_a = 1,11 \ell (v + 0,1v^2) (d - 9,3 \cdot 10^{-6}), \quad (7)$$

где ℓ – длина волокна (м).

Аналитическое решение уравнения (7) в общем виде приведено в [2].

Известно [2], что имеется экспоненциальная зависимость скорости от времени, то есть скорость асимптотически стремится

к максимальной величине v_∞ (постоянной скорости волокна) при $t \rightarrow \infty$. Результаты численного моделирования скорости v и перемещения h волокна для нашего конкретного случая подробно изложены в [4]. Подразумеваем под временем t установления постоянной скорости время, за которое скорость достигнет примерно 90% асимптотического значения [2], для наших расчетов величина постоянной скорости

$v_\infty = 12,5$ м/с. Тогда, задаваясь значением времени $t = 0,02$ с, получаем скорость установившегося движения волокна флюка $v_y = 10,7$ м/с, при этом величина межэлектродного расстояния равна $h = 0,13$ м. С очень небольшой погрешностью (меньше 1%) можно принять за оптимальное межэлектродное расстояние $h_0 = 0,10$ м [4].

Таким образом, выбор скорости v_y поступательного перемещения волокна при заданном времени является решающим при определении оптимального межэлектродного расстояния [2]. При электрофлюкировании значительно увеличивать межэлектродное расстояние (при постоянной напряженности поля E) нецелесообразно из-за стекания зарядов с волокон во время их полета, и в случае, когда работают при напряжении заряжающего электрода флюкатора, близком к максимальному значению, даваемому генератором, это сделать невозможно [2].

Таким образом, выражая зависимость силы лобового сопротивления воздуха движению волокна от скорости и параметров волокна эмпирической формулой С. Андерсона и Р. Стьюбса [7], можно получить и решить уравнение перемещения волокна в аналитическом виде.

Рассчитаем силу аэродинамического сопротивления по формуле (7):

$$F_a = 1,11 \cdot 10^{-3} (10,7 + 0,1 \cdot 10,7^2) (0,019 \cdot 10^{-3} - 9,3 \cdot 10^{-6}) = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ (Н)}. \quad (8)$$

При движении волокна с установившейся скоростью сила аэродинамического сопротивления примерно равна силе электрического взаимодействия заряженного волокна с полем.

При оценке типа обтекания волокна потоком воздуха число Рейнольдса, равное $Re = 53,6$ [4], позволяет говорить об образовании стационарных вихрей при движении волокна [8].

Для определения величины заглубления волокна флюка в клеевом слое воспользуемся энергетическим методом, основанным на законе сохранения энергии. Движущееся волокно обладает кинетической энергией:

$$W_b = \frac{m_0 v_y^2}{2} = \frac{0,323 \cdot 10^{-9} \cdot 10,7^2}{2} = 18,5 \cdot 10^{-9} \text{ (Дж)}. \quad (9)$$

По закону сохранения энергии кинетическая энергия движущегося в направлении потока волокна должна соответствовать работе силы лобового сопротивления адгезива, другими словами, энергия волокна при ударе о вязкую жидкость расходуется на преодоление ее сопротивления и нагревание жидкости.

Опытным путем установлено, что для ламинарного и турбулентного обтекания

$$F_{лс} = 1,11 \cdot 3,14 \cdot (3,56 \cdot 10^{-5})^2 \cdot \frac{1056 \cdot 10,7^2}{2} = 26,7 \cdot 10^{-5} \text{ (Н)}. \quad (11)$$

Рассчитанное при этом число $Re=0,1 < 0,5$ показывает, что пограничный слой в адгезиве отсутствует и значительную роль играет вязкостное трение, которое приводит к потере механической энергии, то есть тормозит тело [8].

Из формулы, приведенной в [1], определяем расчетное значение глубины Δh_p проникновения волокна в клей:

$$\Delta h_p = \frac{W_b}{F_{лс}} = \frac{18,5 \cdot 10^{-9}}{26,7 \cdot 10^{-5}} = 0,069 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}, \quad (12)$$

где W_b – кинетическая энергия волокна, определенная по формуле (9).

Разность между расчетным Δh_p и фактическим $\Delta h_\phi = 0,06 \cdot 10^{-3}$ (м) значениями глубины проникновения волокна в адгезив для флокированной нити линейной плотности 270 текс составила 13,0 % [4].

Разработанный метод позволяет теоретически обосновать физико-технологические параметры процесса электрофлокирования: максимально-возможный заряд

тел можно использовать единую формулу для расчета силы лобового сопротивления $F_{лс}$ [8]:

$$F_{лс} = C_x (Re) s \frac{\rho v^2}{2} \text{ (Н)}, \quad (10)$$

где v – скорость волокна перед соударением с адгезивом, равная 10,7 м/с; ρ – плотность адгезива, равная 1056 кг/м³.

Рассматривая проникающее в адгезив волокно как диск с эквивалентным радиусом r_3 (м), рассчитанным по (1), определяем площадь его поперечного сечения по формуле $s = \pi r_3^2$ и, принимая коэффициент лобового сопротивления тела данной формы (диска) $C_x(Re)$ равным 1,11 [8], рассчитываем силу лобового сопротивления волокна $F_{лс}$ по формуле (10):

флюка, скорость его установившегося движения, оптимальное межэлектродное расстояние и величину заглубления флюка в слое адгезива и, таким образом, на стадии проектирования оценить предельные возможности технологии электрофлокирования, создать теоретические предпосылки для управления динамикой процесса и прогнозирования свойств флокированных материалов.

В Ы В О Д Ы

1. На основе разработанного метода выполнен комплексный силовой анализ взаимодействия поступательно движущегося заряженного волокна с электростатическим полем с учетом соответствующих параметров в аналитических и эмпирических зависимостях для конкретного случая.

2. Теоретически обоснованы технические и технологические решения процесса электрофлокирования, позволяющие прогнозировать свойства получаемого флокированного материала. При максимально возможном заряде полиамидного волокна

флока $4,36 \cdot 10^{-13}$ Кл и скорости установившегося движения 12,5 м/с межэлектродное расстояние составляет 0,13 м, при этом разность между рассчитанным теоретически 0,069 мм и фактическим 0,06 мм значениями заглубления волокна флока в клеевой слой составляет 13,0 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Радовицкий В.П., Стрельцов Б.Н.* Электроаэромеханика текстильных волокон. – М.: Легкая индустрия, 1970.

2. *Бершев Е.Н.* Электрофлокирование (нанесение ворса в электростатических полях). – М.: Легкая индустрия, 1975.

3. *Бершев Е.Н.* Физические основы технологии электрофлокирования. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1984.

4. *Сцепуржинская З.Р.* Разработка и исследование технологии флокированной нити: Дис... канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. М.Н. Косыгина, 2011.

5. Физические величины: Справочник/ Бабичев А.П., Бабушкина Н.А. и др.; Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

6. *Иванов О.М.* Развитие теории и технологии производства электрофлокированных материалов: Дис... докт. техн. наук. – С-Пб., т.1,2. 2007.

7. *Anderson S.L., Stubbs R.* Use of Air Currents for Tensioning Fibres // J. the Text. Inst. Transactions. – Vol 42. № 2, 1958. P.53...57.

8. *Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А.* Механика сплошных сред / Курс лекций. Физический факультет МГУ. – М.: Изд-во Физического факультета МГУ, 1998. С. 78...80.

Рекомендована кафедрой прядения. Поступила 23.05.12.